

Treball de Fi de Grau

# **GRAU EN ENGINYERIA EN TECNOLOGIES INDUSTRIALS**

## **Estudi comparatiu de diverses taules de surf**

### **MEMÒRIA**

**Autor:** Júlia Padreny Carmona  
**Director:** Enric Trillas Gay  
**Convocatòria:** Juny 2018



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona





## Resum

El surf és un esport aquàtic. El material que es necessita per tal de practicar-lo són una taula de surf i, a vegades, el neoprè. Primerament, s'ha de pensar quin tipus de taula es necessita. Qualsevol persona que hagi sentit a parlar d'aquest esport sap que per començar a practicar-lo és millor una taula amb molt volum, el que es coneix com a *Softops*. Després, un cop aquesta persona va perfeccionant la tècnica en aquest esport, passarà a utilitzar taules amb cada vegada menys volum. Així doncs, la següent taula que utilitzarà segurament serà una *evolutiva* fins finalment, passar a les *shortboard*.

No obstant això, la taula de surf no ve tan sols relacionada amb el nivell que té l'esportista sinó que és molt important el tipus d'onada en la que es practicarà aquest esport. De fet, se sap que en total hi ha 9 models de taules de surf diferents. Tanmateix, per cada tipus de taula s'utilitzen moltes variants de formes en funció si el que es vol és tenir més equilibri, més velocitat sobre l'onada, millor maniobrabilitat, tenir més sensacions de moviment en contacte amb l'aigua, etc.

Així, tenint una idea inicial de quina geometria hauria de tenir cada taula en funció del tipus d'onada i el nivell de l'esportista, en el present treball s'analitzarà analíticament aquesta afirmació tot arribant a resultats i conclusions.

Per tal de dur a terme aquest estudi, s'utilitzaran els coneixements de l'assignatura de mecànica de fluids: la sustentació, la resistència a l'avanç, així com el camp de velocitats i el camp de pressions sobre la geometria de la taula de surf, entre d'altres. Es farà ús de *Shape3D*, *Solidworks* i *Ansys Fluent (CFD)* com a material de suport per a la realització de tota la part experimental de l'estudi.



# Sumari

<b>RESUM</b>	<b>3</b>
<b>SUMARI</b>	<b>5</b>
<b>LLISTAT DE FIGURES, TAULES I GRÀFICS</b>	<b>8</b>
Figures .....	8
Taules .....	12
Gràfics .....	13
Equacions .....	13
<b>1. NOMENCLATURA</b>	<b>15</b>
<b>2. PREFACI</b>	<b>17</b>
2.2. Origen del projecte i motivació .....	17
2.3. Estudis previs .....	18
<b>3. INTRODUCCIÓ DEL PROJECTE</b>	<b>19</b>
3.1. Objectius del projecte .....	19
3.2. Abast del projecte .....	19
<b>4. INTRODUCCIÓ A LA DINÀMICA DE FLUIDS</b>	<b>21</b>
4.1. Nombres adimensionals .....	21
4.1.1. Nombre de Reynolds (Re) .....	22
4.2. Forces de resistència a l'avanç i de sustentació .....	22
4.2.1. Força i coeficient de resistència a l'avanç / drag .....	23
4.2.2. Força i coeficient de sustentació / lift .....	23
4.3. Força de pressió i de fregament .....	24
4.3.1. Força de pressió .....	24
4.3.2. Força de freqüència .....	25
4.4. Capa límit i flux potencial .....	25
4.4.1. Estructura i transició de la capa límit .....	26
4.4.2. Separació de la capa límit .....	26
4.5. Relacions teòriques amb les taules de surf .....	27
4.5.1. Eficiència aerodinàmica .....	27
4.5.2. Relació entre l'angle d'atac amb el Lift i el Drag .....	28

<b>5. INTRODUCCIÓ AL SURF</b>	<b>29</b>
5.1. Història del surf	29
5.1.1. Perú, Polinèsia i Hawaii	30
5.1.2. Renaixement del surf	31
5.1.3. El surf a l'actualitat	33
5.2. Característiques de la taula	35
5.2.1. Nose	35
5.2.2. Rail	36
5.2.3. Rocker	36
5.2.4. Bottom	37
5.2.5. Tail	38
5.3. Tipus de taules de surf	39
<b>6. ANÀLISIS DEL MODEL 3D PER RICCARDO ROSSI</b>	<b>45</b>
6.1. Riccardo Rossi i CFD	45
6.2. L'anàlisi del tail o cua	45
6.3. L'estudi dels Rails	47
6.4. L'anàlisi del Tail Rocker o curvatura de cua	48
6.5. Turbulència del fluid al voltant de la taula	50
6.6. Comparació dels perfils variant la velocitat	50
<b>7. FASE DE SIMULACIÓ: ANÀLISI DEL DIVERSOS MODELS DE TAULES DE SURF EN 2D</b>	<b>53</b>
7.1. Consideracions per a l'anàlisi:	53
7.2. Procediment que s'ha seguit fins extreure els resultats	54
7.2.1. Fase inicial	54
7.2.2. Pre-procés	55
7.2.3. Definició del Set-Up	58
7.2.4. Resolució	59
7.2.5. Post-procés	61
7.3. Resultats dels camps de pressions i velocitats	61
7.3.1. SUP	61
7.3.2. Longboard	63
7.3.3. Gun	64
7.3.4. Malibu	66
7.3.5. Evolutiva	67
7.3.6. Taula shorboard estàndard	68
7.3.7. Taula shortboard innovadora	70

7.3.8. Retro .....	71
7.3.9. Fish .....	72
7.3.10. Tow-In .....	73
7.4. Resultats del C <sub>D</sub> .....	75
7.5. Comprovació dels resultats .....	76
<b>8. PLANIFICACIÓ .....</b>	<b>79</b>
<b>9. ESTUDI ECONÒMIC .....</b>	<b>81</b>
<b>10. IMPACTE AMBIENTAL .....</b>	<b>83</b>
<b>11. CONCLUSIONS DEL TREBALL .....</b>	<b>85</b>
<b>AGRAÏMENTS .....</b>	<b>87</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>89</b>
Referències bibliogràfiques .....	89
Bibliografia complementària .....	89
<b>ANNEX .....</b>	<b>91</b>
Explicació dels tipus de bottoms i tails .....	91
Bottoms .....	91
Tails .....	91
Mallats .....	93
Plànols de les taules de surf .....	94
Plànols del SUP .....	94
Plànols del longboard .....	94
Plànols de la Gun .....	95
Plànols de la Malibu .....	95
Plànols de l'Evolutiva .....	96
Plànols de la Shortboard .....	96
Plànols de la retro .....	97
Plànols de la Fish .....	97
Plànols de la Tow-In .....	98
Model en 3D .....	99

## Llistat de figures, taules i gràfics

### **Figures**

<i>Figura 1: túnel de vent per una ala d'avió [18]</i>	23
<i>Figura 2: Capa límit [18]</i>	25
<i>Figura 3: Característiques de la capa límit [18]</i>	26
<i>Figura 4: Despreniment causa d'un canvi brusc de geometria [18]</i>	26
<i>Figura 5: Angle d'atac del perfil d'ala d'avió [18]</i>	28
<i>Figura 6: Duke Kahanamoku, el pare del surf modern [8]</i>	32
<i>Figura 7: Tom Blake i les diferents taules de surf [8]</i>	33
<i>Figura 8: Kelly Slater, onze vegades campió del títol mundial de surf [9]</i>	34
<i>Figura 9: Parts d'una taula de surf [10]</i>	35
<i>Figura 10: la Panda Doinker Egg, la Hypto Krypto i la Mad Cat mostrant els tipus de nose [15]</i>	36
<i>Figura 11: tipus de Rails [17]</i>	36
<i>Figura 12: Tipus de rocker d'una taula de surf [12]</i>	37
<i>Figura 13: heavy and relaxed rocker [12]</i>	37
<i>Figura 14: Tipus de bottoms [14]</i>	38
<i>Figura 15: tipus de tail [13]</i>	38



<i>Figura 16: Diferents tipus de taules de surf [10]</i>	39
<i>Figura 17: Stand Up Paddle Board [10]</i>	40
<i>Figura 18: Longboard [10]</i>	40
<i>Figura 19: Gun [10]</i>	41
<i>Figura 20: Malibu (Mini-Longboard) [10]</i>	41
<i>Figura 21: Taula evolutiva [10]</i>	42
<i>Figura 22: El surfista Julian Wilson amb una shortboard [10]</i>	42
<i>Figura 23: Taula retro [10]</i>	43
<i>Figura 24: Taula Fish [10]</i>	44
<i>Figura 25: Tow-in surfboard [10]</i>	44
<i>Figura 26: Kelly Slater Top turn a CloudBreak</i>	46
<i>Figura 27: Distribució de pressions en el Top Turn [2]</i>	47
<i>Figura 28: Efecte i comparació del flux d'aigua mitjançant el camp pressions en el Rail durant una corba en l'onada. S'ha comparat un Rail amb curvatura suau (esquerra) amb un de curvatura agressiva (dreta). [2]</i>	48
<i>Figura 29: Comparació del Rocker Tail [2]</i>	49
<i>Figura 30: Turbulència al voltant de la taula Sci-Fi i Omni [2]</i>	50
<i>Figura 31: Comparació de la força de drag causada per la fricció en els models (d'esquerra a dreta) OMNI, Vader i SciFi. [2]</i>	51
<i>Figura 32: Superfície de la taula estàndard creada amb SolidWorks</i>	54

<i>Figura 33: Geometria per a la simulació de la Taula Estàndard</i>	55
<i>Figura 34: Parts del volum de control segons les condicions de contorn</i>	55
<i>Figura 35: Mètode del mallat: tot triangles</i>	56
<i>Figura 36: Mallat de la taula estàndard</i>	56
<i>Figura 37: Mallat al voltant del perfil de la taula de surf</i>	57
<i>Figura 38: Mínima, màxima i mitjana de Skewness</i>	57
<i>Figura 39: Nombre d'elements per cada Skewness</i>	57
<i>Figura 40: Paràmetres apartat General</i>	58
<i>Figura 41: Tipus de Model</i>	58
<i>Figura 42: Reference Values</i>	59
<i>Figura 43: Inicialització i Càlculs del problema</i>	59
<i>Figura 45: Número d'iteracions fetes fins a la convergència dels residus</i>	60
<i>Figura 45: Evolució dels residus</i>	60
<i>Figura 46: Evolució del coeficient de Drag</i>	60
<i>Figura 47: Camp de pressions del SUP</i>	62
<i>Figura 48: Camp de velocitats del SUP</i>	63
<i>Figura 49: Camp de pressions del longboard</i>	63
<i>Figura 50: Camp de velocitats del longboard</i>	64

<i>Figura 51: Camp de pressions de la Gun</i>	65
<i>Figura 52: Camp de velocitats de la Gun</i>	65
<i>Figura 53: Camp de pressions de la Malibu</i>	66
<i>Figura 54: Camp de velocitats de la Malibu</i>	67
<i>Figura 55: Camp de velocitats de l'Evolutiva</i>	67
<i>Figura 56: Camp de pressions de l'Evolutiva</i>	68
<i>Figura 57: Camp de pressions de la taula estàndard</i>	69
<i>Figura 58: Camp de velocitats per a la taula estàndard</i>	70
<i>Figura 59: Distribució de pressions per a la taula innovadora</i>	70
<i>Figura 60: Distribució de vectors velocitat per a la taula innovadora</i>	71
<i>Figura 61: Distribució de pressions per a la taula retro</i>	71
<i>Figura 62: Distribució de vectors velocitat per a la taula retro</i>	72
<i>Figura 63: Distribució de pressions per a la taula Fish</i>	72
<i>Figura 64: Distribució de velocitat de la taula Fish ampliada</i>	73
<i>Figura 65: Camp de distribució de pressions per a la taula Tow-In</i>	73
<i>Figura 66: Camp de distribució de vectors velocitat per a la taula Tow-In</i>	74
<i>Figura 67: Cos semi infinit Rankine [5]</i>	77
<i>Figura 68: Oval de Rankine [5]</i>	77

<i>Figura 69: Plànols del SUP amb el programa Shape3D</i>	94
<i>Figura 70: Plànols del longboard amb el programa Shape3D</i>	94
<i>Figura 71: Plànols de la Gun amb el programa Shape3D</i>	95
<i>Figura 72: Plànols de la Malibu amb el programa Shape3D</i>	95
<i>Figura 73: Plànols de l'evolutiva amb el programa Shape3D</i>	96
<i>Figura 74: Plànols de mesures de la taula estàndard amb Shape3D</i>	96
<i>Figura 75: Plànols de mesures de la taula retro amb Shape3D</i>	97
<i>Figura 76: Plànols de mesures de la taula fish amb Shape3D</i>	97
<i>Figura 77: Relacions trigonomètriques per a la Cua d'Oreneta</i>	98
<i>Figura 79: Plànols de mesures de la taula Tow-In amb Shape3D</i>	98
<i>Figura 80: Pressió de la taula en 3D</i>	99
<i>Figura 81: Vectors velocitat de la taula en 3D</i>	99

## **Taules**

<i>Taula 1: Taula resum de les pressions i velocitats màximes de cada taula de surf estudiada</i>	74
<i>Taula 2: Longitud, amplada, àrea i Coeficient de Drag de totes les taules</i>	75
<i>Taula 3: Relació amplada i longitud amb el coeficient de resistència al avanç</i>	76
<i>Taula 4: Equacions teòriques de la velocitat màxima</i>	77

<i>Taula 5: Activitats del projecte, inici i final</i>	80
<i>Taula 6: Cost total del projecte</i>	82
<i>Taula 7: Mallat utilitzat per a les diverses taules</i>	93

## **Gràfics**

<i>Gràfic 1: Anàlisi de l'efecte de la curvatura del rocker pel que fa a la pressió de l'aigua al llarg de l'ànima de la taula. [2]</i>	49
<i>Gràfic 2: Diagrama de Gantt de les activitats realitzades durant el projecte</i>	80

## **Equacions**

<i>Equació 1: Fórmula de Reynolds</i>	22
<i>Equació 2: Eficiència aerodinàmica</i>	27
<i>Equació 3: Cos semi infinit de Rankine</i>	76
<i>Equació 4: Oval de Rankine</i>	76



# 1. Nomenclatura

$V_C$	Volum de control
$\rho$	Densitat del fluid [kg/m <sup>3</sup> ]
$\mu$	Viscositat dinàmica del fluid [kg/ms]
$F_L$	Força de <i>lift</i> o sustentació [N]
$F_D$	Força de <i>drag</i> o de resistència a l'avanç [N]
$C_L$	Coeficient de <i>lift</i>
$C_D$	Coeficient de <i>drag</i>
$\eta$	Eficiència del perfil
$V_{màx}$	Velocitat màxima del fluid
$P_{màx}$	Pressió màxima del fluid
$V / U_{\infty}$	Velocitat inicial del fluid [m/s]
$\Delta P$	Diferència entre la pressió màxima i mínima [Pa]
<i>nose</i>	Punta de la taula de surf
<i>rocker</i>	Curvatura de la punta taula de surf
<i>outline</i>	Relleu / perfil de la taula de surf
<i>tail</i>	Cua de la taula de surf
<i>rail</i>	Cant de la taula de surf
<i>hard rail</i>	Cant pronunciat
<i>soft rail</i>	Cant suau
<i>board</i>	Taula de surf
<i>nose / tail rocker</i>	Curvatura davantera / del darrera de la taula





## **2. Prefaci**

### ***2.2. Origen del projecte i motivació.***

Durant els quatre anys del Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials he tingut el plaer de poder cursar un ampli ventall d'assignatures relacionades en diferents sectors de l'enginyeria. Malgrat tot, no va ser fins el tercer any del grau, que vaig trobar una assignatura que em va motivar molt, Mecànica de Fluids. Ara, veient-ho amb perspectiva, puc arribar a dir que el que em va apassionar era que el contingut de l'assignatura estava molt relacionat amb el meu esport, el surf. Així doncs, vaig voler aprofitar l'oportunitat perfecta per aprendre més profundament sobre els dos àmbits.

Tot va començar quan vaig voler superar la meva fòbia al mar. Els experts deien que el millor seria passar-hi petites estones fins que arribi a poder-hi estar amb tranquil·litat. Però, vaig tenir la gran idea de provar aquest esport. La primera vegada que em vaig aixecar, vaig notar com la taula lliscava en la superfície de l'aigua i em vaig quedar fascitada de la velocitat en que em propulsaven les escumes sorgides de les onades. Amb aquell primer dia en vaig tenir suficient per voler millorar dia rere dia i perdre per complert la por que tenia. Més tard, em vaig iniciar al windsurf i vaig començar a donar classe d'ambdós esports en una escola nàutica.

Durant aquella època, vaig tenir l'oportunitat de poder experimentar diferents taules de surf, és a dir, taules amb diferents formes i volums. En les hores lliures intentava entendre, mitjançant els meus coneixements de Mecànica de Fluids, el perquè era més efectiva una taula que una altra en funció del tipus d'onada i del nivell de l'alumne. A part, anava a fer surf amb els meus companys i, ens intercanviàvem les taules. Així, també em vaig demanar com és que les sensacions, en una mateixa onada, eren tan diferents amb una forma o amb una altra.

Així doncs, vaig pensar que estudiar i analitzar les diverses formes de les taules de surf era un tema prou motivador i entretingut per poder realitzar un bon treball de final de grau. Alhora, m'ajudaria a conèixer millor el món del surf i a començar a tenir un petit contacte en aquesta indústria. Per altra banda, amb l'excusa d'aquest treball podria adquirir més

coneixements sobre la Mecànica de Fluids.

### **2.3. Estudis previs**

Aquest projecte, va començar a tenir un objectiu clar en el moment que Riccardo Rossi, enginyer dedicat al camp de la dinàmica computacional de fluids, des de l'experiència, va donar-me petits consells per a una millor planificació d'aquest treball.

De fet, en la recerca inicial d'informació pel projecte vaig trobar un vídeo on, en 15 minuts, l'enginyer explicava perfectament el que era el meu objectiu clar del treball [1]. Per tant, vaig voler contactar amb ell per poder demanar-li consell.

Així va ser, mitjançant "skypes" vam poder trobar la millor solució per arribar a bons resultats, és a dir, similars als que ell havia trobat en els seus estudis previs. Tanmateix, cal aclarir que s'han hagut de prendre aquestes consideracions, ja que el mateix científic, dedicat a aquest àmbit, em va informar que el vídeo que havia escoltat en 15 minuts, a ell li va portar 1 any sencer en tenir-ho tot a punt.

## **3. Introducció del projecte**

### **3.1. Objectius del projecte**

L'objectiu d'aquest projecte és fer ús dels coneixements de l'assignatura de Mecànica de Fluids per tal d'arribar a conclusions comparant i estudiant diverses formes de taules de surf. S'estudiarà el comportament d'un flux al voltant dels diferents perfils mitjançant un programa de simulació de la Mecànica Computacional de Fluids (CFD). Per tant, un altre objectiu que conté aquest treball és ampliar els coneixements de l'autor d'aquest projecte en el software.

Per altra banda, es vol analitzar de quina forma s'adequa millor al gust del surfista, és a dir, quina taula necessita per tal de poder obtenir més maniobrabilitat, més rapidesa, etc.

Per acabar, tots els treballs de final de grau tenen un mateix objectiu comú i és el de descobrir nous escenaris per a futures investigacions, enriquint així la curiositat de l'estudiant i el seu interès en la matèria.

### **3.2. Abast del projecte**

En un principi s'ha volgut fer un estudi acurat d'un flux bifàsic en una figura 3D però, degut a la curta durada del projecte i als pocs coneixements inicials de l'autor d'aquest treball en el programa de simulació, s'han hagut de fer aproximacions amb les qual es podrà extreure les conclusions adients.

De fet, s'ha simulat la superfície de diferents taules de surf en 2D durant el descens de l'onada. Per tant, s'ha dit que es tindrà una placa plana i un sol fluid, l'aire.

Més tard, s'ha volgut passar de la figura 2D a la 3D per tal de donar-li una forma més similar a la realitat tot i que, s'ha continuat utilitzant l'aproximació que només hi intervé un fluid en el moviment. Malgrat tot, aquest estudi no ha aportat informació rellevant i és per aquest motiu que en la part de simulació no hi apareix l'anàlisi en 3D. Aquest estudi es troba a l'annex.

No obstant això, al tractar-se d'un estudi purament comparatiu al que se li ha donat més rellevància són a les diferències entre els resultats obtinguts, més que als resultats en sí mateixos, donat que gràcies a aquestes s'ha pogut extreure la informació per poder arribar a les conclusions.

Finalment, aquestes conclusions s'han comparat amb estudis d'altres simulacions fetes acuradament a l'objectiu que tenia aquest Treball de Final de grau i s'ha valorat si les aproximacions preses eren vàlides per tal d'arribar al mateix objectiu.

## **4. Introducció a la dinàmica de fluids**

El medi amb el que interactua la taula de surf és l'aigua i l'aire per tant, es tracta d'un *flux bifàsic*. Aquest cas es té quan flueixen simultàniament dos fases de fluids. La superfície que separa ambdues es diu *interfase* (en aquest cas la taula de surf) i, a través d'ella les fases poden intercanviar massa, moments o energia.

No obstant, degut a les limitacions del projecte, s'ha realitzat l'estudi tan de 2D com de 3D en aire. A través de les seves propietats com per exemple la densitat o la viscositat, l'aire és capaç de transmetre unes forces i moments que es tradueixen a les propietats físiques que sent el surfista a l'onada. L'encarregada d'estudiar aquesta interacció és la dinàmica de fluids. En aquest cas, ja que es tracta de gasos en moviment, es parlà d'aerodinàmica.

A continuació es realitzarà una breu presentació de les nocions més importants de la dinàmica de fluids per tal de fer més entenedor aquest treball.

### **4.1. Nombres adimensionals**

Una constant física adimensional és un nombre que no té unitats físiques que el defineixin i, per tant, és un nombre pur. Els nombres adimensionals es defineixen com a productes o quocients de quantitats que sí que tenen unitats, de tal forma que totes elles s'anul·len. En funció del seu valor, aquests nombres tenen un significat físic que caracteritza determinades propietats d'alguns sistemes. Aquests nombres, s'utilitzen per representar resultats experimentals de forma molt simplificada gràcies a l'anàlisi dimensional.

L'anàlisi dimensional és un mètode utilitzat per reduir el nombre i la complexitat de les variables que intervenen en un fenomen físic mitjançant els nombres adimensionals. Aquest mètode té certs avantatges: l'estalvi de temps i diners en dur a terme l'estudi, ajuda a pensar i planificar un experiment o teoria i per últim, proporciona lleis d'escala que permeten extrapolar els resultats obtinguts en un model a escala reduïda als del prototipus real.

Existeixen gran quantitat de nombres adimensionals i, depenent del problema a optimitzar se n'utilitzen uns o altres. El protagonista d'aquest treball serà el Nombre de Reynolds.

#### **4.1.1. Nombre de Reynolds (Re)**

El nombre de Reynolds és el nombre més utilitzat en Mecànica de Fluids i relaciona les forces inercials i les forces viscoses presents en un fluid. La seva formula és la següent:

$$Re = \frac{V \cdot L}{\nu} = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu}$$

*Equació 1: Fórmula de Reynolds*

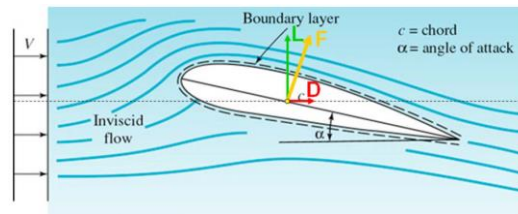
On :  $\rho$ : densitat del fluid  
 $V$ : velocitat del fluid  
 $L$ : longitud característica del sistema  
 $\mu$ : viscositat del fluid

Un nombre de Reynolds elevat suposa un flux poc viscos o a altes velocitats, al qual anomenem *flux turbulent*, i un Reynolds baix significa un flux viscos o de velocitat baixa, el qual s'anomena *flux laminar*.

En un flux laminar les línies de corrent són sempre paral·leles mentre que en un flux turbulent, es troben desordenades. Per tant, per tal de determinar si un flux és laminar o turbulent, es farà mitjançant el número de Reynolds.

## **4.2. Forces de resistència a l'avanç i de sustentació**

Moltes vegades es fan proves on la maqueta o el prototip es desplacen o es submergeixen parcialment o totalment. Per exemple, en la realització de les proves en túnels de vent. En aquests casos apareixen una forces que el fluid exerceix sobre el cos.



*Figura 1: túnel de vent per una ala d'avió [18]*

On:

- L és la sustentació, equilibra el pes.
- D és la resistència a l'avanç, perd quantitat de moviment.

#### **4.2.1. Força i coeficient de resistència a l'avanç / drag**

És la força que sempre té la direcció del desplaçament del cos però en sentit contrari. D'aquesta manera, dificulta el moviment. Té la següent fórmula:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_\infty^2 \cdot C_D \cdot A_D$$

On:

- $\rho$ : densitat del fluid
- $C_\infty$ : velocitat relativa entre el fluid i el cos
- $C_D$ : coeficient de resistència a l'avanç
- $A_D$ : Àrea del cos projectada en la direcció del desplaçament, rep el nom d'àrea frontal

#### **4.2.2. Força i coeficient de sustentació / lift**

Es la força que pot aparèixer en la direcció perpendicular al desplaçament de l'objecte. El seu sentit depèn de cada cas. Per exemple, un avió utilitza aquesta força per a que pugui volar mentre que un cotxe de competició l'utilitza per tal de mantenir el vehicle prop del terra. Té la següent fórmula:

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_\infty^2 \cdot C_L \cdot A_L$$

On:

- $\rho$ : densitat del fluid
- $C_\infty$ : velocitat relativa entre el fluid i el cos
- $C_L$ : coeficient de sustentació
- $A_D$ : Àrea del cos projectada en la direcció perpendicular al desplaçament

Així, pel que fa al coeficient de sustentació, tal i com es pot apreciar a la fórmula anterior, relaciona la força de sustentació amb la densitat del fluid, la seva velocitat i la superfície que intervé. És funció de l'angle d'atac, el nombre de Reynolds i el nombre de Mach.

Tan el coeficient de resistència a l'avanç com el de sustentació s'obtenen experimentalment. La forma del cos i la rugositat els modifiquen. En aquest treball es considerarà que la rugositat es llisa per tant, no afecta en l'obtenció del valor dels coeficients. Així doncs, el canvi de forma dels cossos serà el motiu d'estudi.

### **4.3. Força de pressió i de fregament**

Les forces de resistència a l'avanç i de sustentació són el resultat de la força de pressió (perpendicular al cos) i de la força de fregament (tangent al cos).

$$F_D = F_{D_{\text{pressió}}} + F_{D_{\text{fricció}}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_\infty^2 \cdot C_D \cdot A_D$$
$$F_L = F_{L_{\text{pressió}}} + F_{L_{\text{fricció}}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_\infty^2 \cdot C_L \cdot A_L$$

#### **4.3.1. Força de pressió**

Quan un cos està submergit en un fluid que es troba a una pressió  $P$ , aquest fluid genera una força sobre la superfície del cos. La direcció d'aquesta serà normal al cos i el seu sentit dependrà de si la pressió relativa és positiva o negativa. Les forces de pressió són les que generen la Resistència de Forma.



#### **4.3.2. Força de frec**

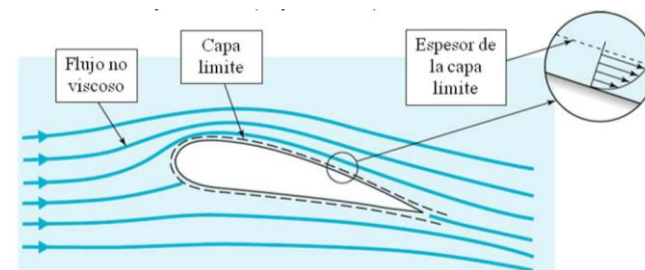
Quan un cos està submergit en un fluid els efectes viscosos provoquen que apareguin les forces de fregament. La seva direcció sempre és tangent a la superfície del cos i el seu sentit és d'oposició al moviment, mai afavoreixen el desplaçament. Aquestes forces són les que generen la Resistència de Fricció.

#### **4.4. Capa límit i flux potencial**

Quan una corrent fluïda incideix sobre un cos es forma sobre la seva superfície una regió de l'espai on la velocitat no és uniforme: la capa límit. Cal remarcar que quan es fa referència al flux de l'interior de la capa límit, s'estarà parlant d'un flux viscos. Per contra, si el flux és extern, és a dir, es troba lluny del cos s'estarà parlant de flux no viscos.

El fenomen de la capa límit fa referència a la condició de no lliscament present sobre la superfície del cos. La velocitat relativa de les partícules que es troben en contacte directe amb la superfície del cos ha de ser nul·la, mentre que les partícules que estan suficientment allunyades d'aquest no es veuen afectades pel cos i per tant, mantenen la velocitat. D'aquesta manera, es crea un gradient de velocitats degut als esforços tallants entre les capes de fluid properes al cos i les més allunyades.

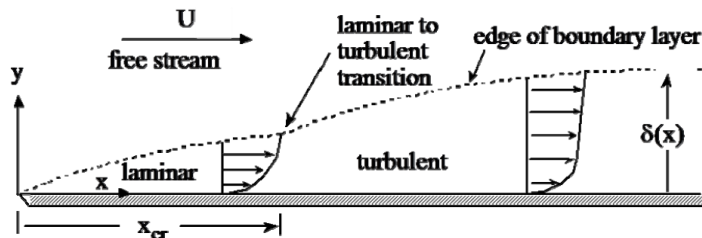
El model de cama límit i flux potencial, es tracta d'un model que serveix a alts nombres de Reynolds i la característica essencial és la divisió d'un flux en dues regions: una capa prima on el flux és viscos i rotacional (Capa límit) i un flux exterior en el qual es poden menysprear els efectes de la viscositat i la rotació (Flux Potencial).



*Figura 2: Capa límit [18]*

#### **4.4.1. Estructura i transició de la capa límit**

En aquest treball, s'ha estudiat la taula de surf com una placa plana. Així doncs, tenint una corrent de velocitat  $U$  paral·lela a una placa plana de longitud  $L$  s'obté:



*Figura 3: Característiques de la capa límit [18]*

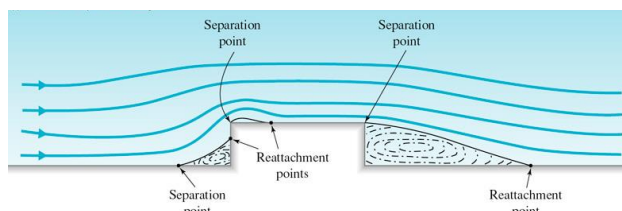
El Reynolds crític o de transició que es pren és de  $5 \cdot 10^5$ . La frontera de la capa límit és la "línia" on la velocitat és el 99% de  $U$ , de aquesta manera es pot considerar que tota la zona exterior a la capa límit té una velocitat  $U$ .

Cal esmentar que el factor de forma és un paràmetre que s'utilitza per avaluar numèricament el despreniment o no de la capa límit.

#### **4.4.2. Separació de la capa límit**

La separació de la capa límit és un fenomen físic que consisteix en la pèrdua d'energia cinètica de les partícules més properes al cos, amb la qual cosa, es separa de la superfície de l'objecte. D'aquesta manera, es generen turbulències provocant una baixada forta de la pressió a la zona posterior de l'objecte.

Físicament la separació apareix quan hi ha un gradient de pressions en augment, es pot demostrar que si aquest gradient és positiu, apareix un flux recirculatori de manera que el flux acaba separant-se.



*Figura 4: Despreniment causa d'un canvi brusc de geometria [18]*

A la *Figura 4* s'aprecia que en la part frontal del cos hi apareix un gradient favorable de pressions ( $dp/dx < 0$ ). No obstant això, en la part posterior del cos hi apareix un gradient advers ( $dp/dx > 0$ ).

La condició teòrica de separació és que hi hagi un punt on el seu esforç tallant sigui nul però, això a la pràctica resulta difícil de trobar. Per aquest motiu, s'utilitza el factor de forma  $H$  per determinar si hi ha o no separació.

Quan la capa límit es va acostant al punt de separació, el factor de forma augmenta ràpidament. Els valors per als quals es considera que es desprèn són per a un flux laminar:  $H > 3,5$  i, per a un flux turbulent:  $H > 2,59$ .

Si la Capa límit es desprèn llavors la Força de Resistència a l'avanç augmenta. Per tant, el que interessa és evitar aquest fenomen o almenys que passi el més tard possible.

En casos que no existeix el despreniment de capa límit, per minimitzar la força de resistència a l'avanç, interessa que la capa límit laminar sigui el més gran possible perquè té una resistència de fricció menor que la turbulenta. Mentre que en casos on sí que hi ha despreniment, interessa que la capa límit laminar sigui la més petita possible ja que, encara que presenta una força de resistència de fricció menor, la resistència de forma és molt més gran que la de la Turbulenta i, a causa de la major importància d'aquesta última, el resultat global és millor.

## **4.5. Relacions teòriques amb les taules de surf**

### **4.5.1. Eficiència aerodinàmica**

L'eficiència és la relació entre el *lift* i el *drag*. Una bona relació entre aquests dos paràmetres en el surf es té quan el *lift* és elevat i el *drag* el més petit possible. De fet, d'aquest últim no interessa tenir-ne massa perquè es vol anar de pressa però, si una mica perquè es vol mantenir el control sobre la taula. S'ha definit l'eficiència com el quocient entre el  $C_L$  i el  $C_D$ .

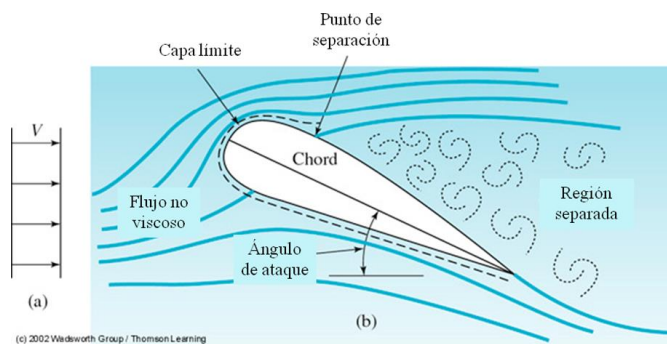
$$\eta = \frac{C_L}{C_D}$$

*Equació 2: Eficiència aerodinàmica*

#### **4.5.2. Relació entre l'angle d'atac amb el Lift i el Drag**

Per tal de fer més entenedora la teoria sobre l'angle d'atac, s'ha utilitzat el perfil d'una ala d'avió. Així doncs, l'angle d'atac és l'angle que forma la corda del perfil i la direcció d'incidència del flux. Cal dir que el vent relatiu és el flux d'aire que es produeix al voltant de l'avió al desplaçar-se. Té la mateixa direcció i sentit contrari a la trajectòria de vol.

L'angle d'atac modifica tan el coeficient de sustentació com el de resistència a l'avanç. De fet, existeix un punt òptim entre el  $C_D$  i el  $C_L$ . Així doncs, arriben a un equilibri oferint màxima sustentació amb mínima resistència d'avanç, és a dir, l'anomenat rendiment màxim, ja que s'està optimitzant una ala d'avió.



*Figura 5: Angle d'atac del perfil d'ala d'avió [18]*

Pel que fa a la simulació feta en aquest treball, s'ha pres un angle d'atac de  $0^\circ$  ja que només s'ha tingut en compte el descens recte de l'onada. En aquest cas, el cos no presenta sustentació ( $C_L = 0$ ). Això és a causa del fet que es tracta d'una forma simètrica i que per tant, el fluid ha de recórrer la mateixa distància per sobre i per sota del cos.

Per altra banda, cal destacar que sí que hi haurà resistència a l'avanç, ja que aquest coeficient existeix sempre que hi ha fricció. La seva existència és causada gairebé únicament pel fregament (viscositat).

## **5. Introducció al surf**

El surf és un dels esports practicats actualment més antics del planeta. Es defineix essencialment com un esport aquàtic, que consisteix a lliscar damunt d'una taula sobre les onades. Fins aquí sembla senzill, però la base del surf és romandre sobre la taula el major temps possible, perquè d'aquesta manera els surfistes es puguin posar dempeus, descendir parets o realitzar diferents maniobres i girs recolzats en la força de les onades. El surfista pot buscar diferents objectius en la pràctica del surf: adrenalina, tècnica, sensacions, etc...

Aquest esport es pot practicar a qualsevol lloc on hi hagi onades que trenquin, és a dir que tinguin escuma, fet que succeeix quan l'energia que mou la massa d'aigua es troba amb un fons relativament petit. Aleshores, l'energia provinent de l'onada no té més remei que projectar-se cap a dalt, fent que la massa de dalt perdi l'equilibri i caigui. Cal esmentar que per a la seva pràctica no cal vent, ja que malgrat que les onades es formen gràcies a aquest, poden sobreviure sense ell (com a mar de fons), encara que molt sovint s'associïn vent i onades, ja que les onades grans les causen els temporals.

Cal esmentar que per a la pràctica del surf no cal vent, ja que malgrat les onades es formen gràcies a aquest, poden sobreviure sense ell (com a mar de fons), tot i que molt sovint s'associïn vent i onades ja que les onades grans les causen els temporals. De fet, en algunes ocasions el vent pot arribar a destruir l'onada.

Finalment, tant les quilles o aletes com el tipus de taula fan que es garanteixi l'equilibri del surfista. Això no obstant, les primeres proporcionen el control i l'adherència a l'onada.

### **5.1. Història del surf**

Per estudiar les diferents taules de surf és imprescindible fer una revisió a la història del surf des dels seus inicis, ja que és impossible entendre els canvis que es van produir en aquestes sense entendre la evolució que va tenir el surf i el context històric en què es va desenvolupar.

### **5.1.1. Perú, Polinèsia i Hawaii**

La història del surf comença uns 1000 a 3000 anys aC, amb unes embarcacions conegudes com Cavallets de Boga, a la regió del Perú i Bolívia. En aquestes regions, els pescadors locals utilitzaven aquestes canoes de 4 a 5 metres d'alçada i de 0,6 a 1 metre d'amplada per la pesca. La seva rellevància a l'evolució del surf és el recorregut que realitzaven els pescadors per dur a terme la pesca.

Els pescadors sortien des de la platja sentats al Cavallet i, amb l'ajuda d'un rem, creuaven la zona d'espuma de les onades fins a arribar a la zona posterior on aquestes trenquen per poder pescar, coneguda com a *Line Up*. Un cop allà, pescaven fins a acumular gairebé uns 50 kg de peix que, posteriorment carregaven a dins del Cavallet, que pesava també uns 45 a 50 kg. Per últim, havien de tornar a la platja assegurant la càrrega, ja que era el producte de tot un dia de feina. Per tornar-hi només hi havia un camí de sortida: navegant les onades en la direcció d'aquestes cap a la platja, fet que es va batejar com *surf* en la seva llengua nativa. A la fase de tornada, per no perdre tot el peix capturat, s'havia d'aconseguir estabilitat a l'embarcació, ja que d'això depenia tot el menjar del poble. Per aconseguir-ho, el que feien era col·locar el rem amb què havien aconseguit arribar fins a la zona de pesca per la part posterior de l'embarcació fins a endinsar-lo uns centímetres dins l'aigua, aconseguint d'aquesta manera garantir la direcció del Cavallet i proporcionar estabilitat.

Una pràctica similar es produïa gairebé simultàniament a la Polinèsia, sobretot a l'Oest. Allà els pescadors també *surfaven* les onades per tornar amb la seva pesca a la platja, però en aquest cas ja ho feien amb el que més endavant serien batejades com les primeres taules de surf conegudes per l'home. Tanmateix, la pesca en aquestes taules era sense rem, i per tant el que es feia per guanyar estabilitat era col·locar els peus fora de la taula, dins l'aigua, de manera que s'aconseguia el mateix efecte però en menor proporció que amb el rem.

Com que els polinesis eren grans navegants, entre el 300 i el 600 dC es van produir diverses migracions per a descobrir noves illes, d'entre elles Hawaii, que avui en dia es coneix com el centre mundial d'aquest esport. Aquests desplaçaments van fer que es traslladessin moltes de les seves tradicions i costums a l'illa, incloent-hi també la pràctica del surf.

No va ser fins al 1778 quan la tripulació del Capità Cook, en una de les seves tres expedicions per l'oceà pacífic tractant de descobrir el pas del Nord-est, va trobar les illes

Hawaii, batejades en aquell moment com illes Sandwich. El capità va observar a Hawaii el que la gent d'allà anomenava el *he'enalu*, l'art de lliscar sobre les onades. *He'e* feia referència al canvi de la forma sòlida a líquida i *nalu* al moviment de la onada. Cook també va adonar-se que el surf que practicaven els hawaïans era una qüestió de jerarquia social. La noblesa duia taules de materials més bons i feia surf a unes platges determinades, reservades únicament per la gent de sang reial, mentre que la resta del poble feia surf on podia i amb taules de qualitat més baixa, molt pesades.

En aquella època, les taules de surf es sotmetien a un ritual sagrat abans de la seva construcció. De fet, només hi havia tres tipus d'arbre amb els quals es pogués construir una taula de surf. El fabricant de taules tallava l'arbre i, al voltant de les arrels hi col·locava un peix com una ofrena als deus. Així, ja podia començar la fabricació de la taula.

Hi havia quatre tipus de taules diferents a l'antic Hawaii. El *paipo* o *kioe*, un *body board*, de 2 a 4 peus de llarg, generalment utilitzat pels nens. Per altra banda, la *alaia* (ah-LAI-ah) o *omo* (O-mo), una taula de mida mitjana, d'uns 8 peus o més. També, el *Kiko'o*, més gran que la *Aalaia*; entre 12 i 18 peus; servia per onades grans, no obstant això, requeria un alt nivell de l'esport. Finalment, el *Olo* (O-lo), una taula de surf molt llarga reservada per a la reialesa que podria ser de 18 a 24 peus de llargada

### **5.1.2. Renaissance del surf**

Amb l'arribada dels *H'aole*, homes blancs o missioners protestants al 1820 Hawaii va començar a ser una societat cristiana colonitzada. Els nadius hawaïans es van haver de vestir, aprendre a llegir i escriure a les escoles que es van fundar, i es van suprimir i prohibir moltes tradicions, entre elles el surf, ja que era immoral que es practiqués amb el cos pràcticament nuu. El surf va sobreviure només en un grup reduït de nadius que vivien al marge de la legalitat a *O'ahu* i seguien fent les seves pròpies taules i fent surf en onades que els missioners no coneixien.

En tot aquest temps, els hawaïans ja feien surf de peu amb taules que encara no portaven quilles, havent de controlar a la perfecció l'equilibri i els moviments necessaris per realitzar maniobres, ja que sense les quilles les taules eren molt inestables i derrapaven amb facilitat.

No va ser fins pocs anys després del 1900 que el surf va reaparèixer, gràcies en part a un grup de nadius entre els quals es trobava Duke Kahanamoku, també conegut com el pare del surf modern o El gran *Kahuna* (el títol que es donava als experts o mestres d'alguna matèria).

Aquest grup de nadius va fundar al 1905 a la platja de *Waikiki* el *Hui Nalu*, un club de surf que, juntament amb el Outrigger Canoa Club fundat el 1907 per tres occidentals també apassionats de l'antic esport dels reis polinesis, van revivre l'esport a base de competicions i exhibicions a la platja de Waikiki.

Gràcies a aquestes influències occidentals i tenint en compte que Duke era també campió olímpic de Natació, quan viatjava pel món per les competicions de natació i trobava onades realitzava exhibicions de surf, les quals van dotar de gran popularitat a l'esport a llocs com Califòrnia, on més endavant va viure-hi, i Austràlia. Aquest fet és dels més importants en aquesta història ja que mentre vivia allà va realitzar múltiples viatges al nord i al sud, escampant la imatge del que més endavant seria conegut com l'estereotip de beach boy, ja que a banda de ser un gran surfista i nadador, també era un excel·lent socorrista i un apassionat de la canoa a rem, i per tant es passava tot el dia a la platja.



*Figura 6: Duke Kahanamoku, el pare del surf modern [8]*

A partir del 1930, els surfistes no en tenien prou en agafar l'onada i lliscar sobre ella. Les seves ambicions van créixer focalitzant-se en la taula que estaven utilitzant. Així és com la tecnologia i el disseny van prendre un paper molt important per proporcionar taules que poguessin combinar les habilitats dels surfistes.

Tom Blake va aconseguir canviar el disseny de taula que s'havia utilitzat fins ara, de fusta massissa, pràcticament sense curvatura longitudinal i sense quilla; a una taula que es



trobava buida per l'interior, més curta en alguns casos i la meitat de lleugera que les que s'havien vist fins aquell moment. Va ser un revolucionari de la tecnologia del surf, el catalitzador de moltes idees que s'havien comentat però que ningú havia realitzat.



*Figura 7: Tom Blake i les diferents taules de surf [8]*

### **5.1.3. El surf a l'actualitat**

Als anys 30 i 40 a Califòrnia es va començar a fer popular el surf, es van celebrar els primers campionats, van aparèixer els primers fotògrafs i revistes de surf però, l'arribada de la Segona Guerra Mundial entre 1939 i 1945 va suposar una pausa al desenvolupament de l'esport.

Després de la guerra, l'evolució del surf ja era imparable. Es van començar a investigar noves formes en les taules de surf, cada vegada més curtes i fines, amb nous materials com la fibra de vidre i l'escuma de poliuretà, van aparèixer publicacions i pel·lícules de surf, fins i tot la música surfera abanderada pels Beach Boys en la dècada dels 60.

A la dècada dels 70 el surf va donar el salt a Europa, es va inventar el vestit de neoprè, es van començar a usar 2 quilles a les taules i van néixer les grans marques com Quiksilver, Billabong, O'Neill i Rip Curl.

Als anys 80 ja es van començar a fer ús de les tres quilles, i els dissenys de les taules ja estaven més evolucionats, cada vegada més a prop a l'actual.

Als 90 Kelly Slater arrasa guanyant 6 dels 11 títols mundials de surf i eclipsa a la resta de *surfers* professionals. Durant aquells anys, es van començar a introduir les quilles desmuntables. Pel que fa a l'estil de surf, va fer un canvi amb noves maniobres com els 360° i els aeris.

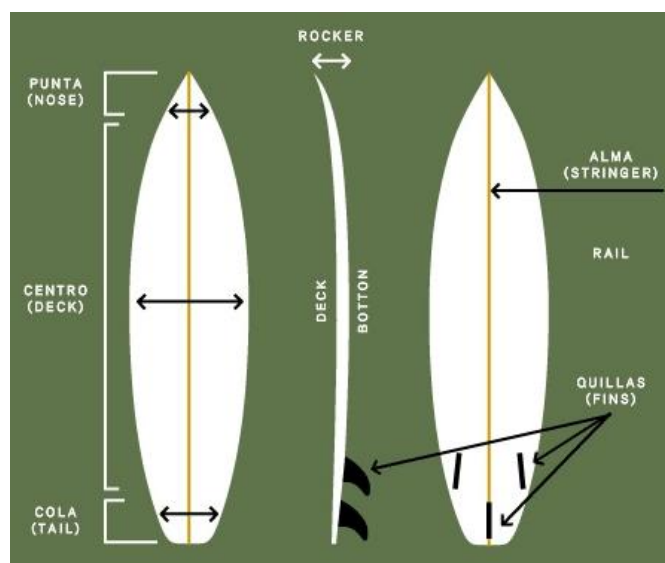
Finalment, el segle XXI la revolució d'Internet afecta també al surf, apareixen les *webcams* en les quals es pot veure les platges en directe i conèixer prediccions d'onades on-line fins amb una setmana d'avançament. Per altra banda, s'usen nous materials que fan les taules més lleugeres i resistents.



*Figura 8: Kelly Slater, onze vegades campió del títol mundial de surf [9]*

## **5.2. Característiques de la taula**

Hi ha molts factors implicats en el funcionament d'una taula de surf, incloent-hi el surfista. Aquests estan relacionats amb el disseny de cada taula, és a dir, la forma que té la punta, la cua, el cant, etc. Totes aquestes parts, les quals es farà referència al llarg del treball, es mostren a la *Figura 9*.



*Figura 9: Parts d'una taula de surf [10]*

D'aquestes, se'n destaquen la punta o *nose*; la cua o *tail*; el *rocker*, que és la curvatura longitudinal de la taula; el *rail* o cant (que és el costat de la taula) i finalment, el *bottom* que és la superfície inferior en contacte amb l'aigua.

### **5.2.1. Nose**

El primer terç de la taula de surf forma part de la punta. Quan es prenen les mesures per a l'amplada d'aquesta part, es prenen a 305 mm de la punta.

Aquesta part repercuteix a la manera de remar i d'agafar onades. El *nose* arrodonit és ideal per onades petites o mitjanes i taules llargues, ja que ajuda a lliscar en onades petites o poc verticals.

Per altra banda, el *nose* punxegut, s'utilitza en taules d'alt nivell. Aquest tipus, dona més resistència en remar. No obstant això, ajuda al surfista alhora de crear la traça en l'onada.

Tanmateix, facilita el moment d'agafar l'onada fent que la punta no es clavi. Per tant, és ideal per a onades verticals. Un altre punt a favor que se li ha trobat al *nose* punxegut és que dóna més facilitat en el moment de passar les onades per sota.



Figura 10: la Panda Doinker Egg, la Hypto Krypto i la Mad Cat mostrant els tipus de nose [15]

### 5.2.2. Rail

El *Rail* d'una taula de surf juga un paper molt important en quant al funcionament de la taula. De fet, abasten tota la longitud de la corda, des de la punta fins a cua.

Hi ha molts tipus de *rails* però, per explicar-ho de forma senzilla, es dirà que es pot tenir un de suau o relaxat i un *rail* més marcat o pronunciat.

Els *soft rails* (*rails* suaus) proporcionen més estabilitat i s'enganxen millor a l'onada mentre que, els *hard rails* (*rails* pronunciats) responen millor a les corbes. Més endavant, a l'apartat 6.3, s'hi entrarà més en detall.

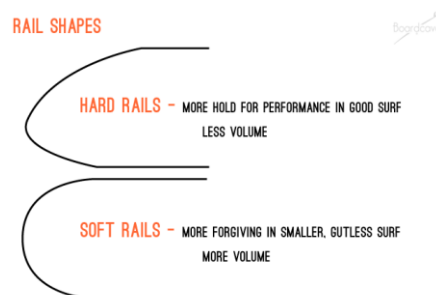
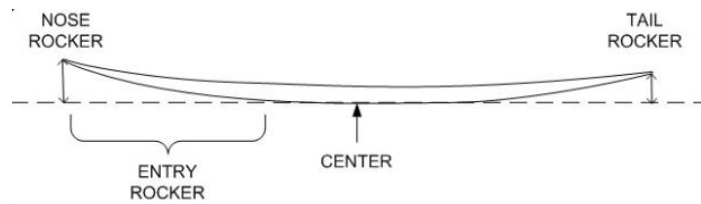


Figura 11: tipus de Rails [17]

### 5.2.3. Rocker

El rocker és l'angle que pren la punta del davant o del darrera de la taula amb l'horitzontal (Figura 12). Així doncs, la curvatura davantera es diu *nose rocker* mentre que la del darrera, se l'anomena *tail rocker*.



*Figura 12: Tipus de rocker d'una tauleta de surf [12]*

En general, es creu que com més rocker tingui una tauleta, millor girarà. No obstant això, menys superfície tocarà l'aigua. Per altra banda, la curvatura del *rocker* farà variar la resistència a l'avanç.



*Figura 13: heavy and relaxed rocker [12]*

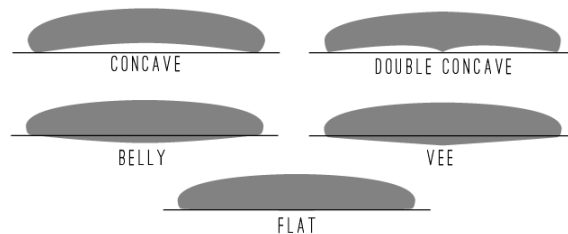
El *nose rocker* és ideal per onades verticals i amb sots, ja que ajuda a que la punta de la tauleta no es clavi tant a l'hora d'aixecar-se com a l'hora de baixar l'onada. Tot i que, això últim es pot evitar mantenint el pes del surfista ben col·locat. Tan mateix, per onades amb menys força, anirà millor una tauleta més plana o amb menys *rocker* a causa de que proporcionarà la velocitat addicional no obtinguda mitjançant la verticalitat de l'onada.

El *tail Rocker* es refereix a la curvatura que té la tauleta de la meitat cap enrere. De fet, a l'apartat 6.4 se'n parlarà molt detalladament de quins són els efectes que produeix un canvi en aquest.

#### **5.2.4. Bottom**

El *bottom* està situat a la part de sota de la tauleta de surf, és a dir, la part que entra en contacte directe amb l'aigua. Cal tenir en compte que el *bottom* no és completament pla. Usualment, entre *Rails* o bé entre l'*stringer* i el *Rail* hi ha una certa curvatura de la superfície que es modela de diferents formes. Serveixen per poder realitzar diverses

conduccions del flux d'aigua entrant pel *nose* i sortint pel *tail*. A la *Figura 14* s'observen els diferents tipus de *bottoms*.



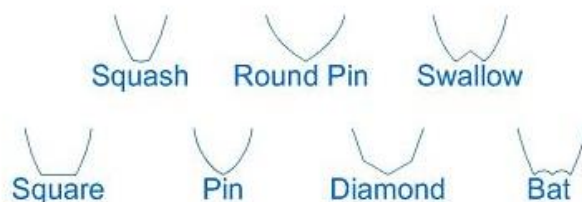
*Figura 14: Tipus de bottoms [14]*

Així doncs, els *bottoms* més comuns són *flat* (pla), *concave* (còncav), *double concave* (doble còncav), *belly* (ventre) i *VEE*. L'explicació exhaustiva de cada tipus de *bottom* es troba a l'annex.

Resumint, la forma còncava tendeix a reduir el *rocker* al llarg de la taula. Això, fa que el flux d'aigua es mantingui sota la taula, pressionant a la curvatura sota del *Rail* i cap a la cua fent que argumenti tant el coeficient de *lift* com el *drag*. [2]

### 5.2.5. Tail

Pel que fa a la cua de la taula, en la *Figura 15* es mostren els diferents tipus. Els *tails* més comuns són els següents: *square tail* (cua quadrada), *squash* (cua quadrada amb vèrtex arrodonits), *pin tail* (cua de punta), *round pin tail* (cua de punta amb vèrtex arrodonits), *swallow tail* (cua d'oreneta), *diamond tail* (cua de diamant) i, *bat tail* (cua de ratpenat). L'explicació exhaustiva de cada tipus de *tail* es troba a l'annex.

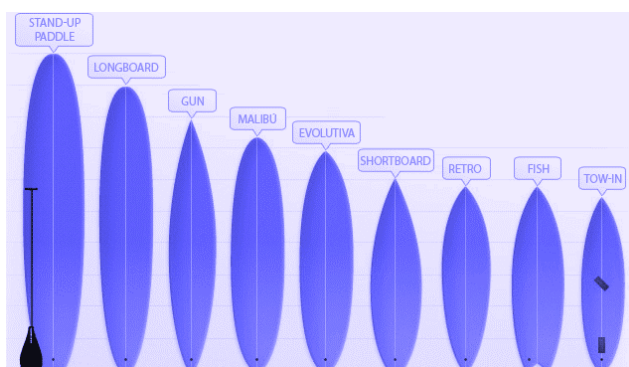


*Figura 15: tipus de tail [13]*

Resumint, el *Squash tail* és una forma adaptada del *Square tail*, els dos alliberen l'aigua ràpidament. Per altra banda, el *Pin tail* i el *Round Pin tail*, l'aigua és alliberada del *tail* i els *Rails* de forma difusa, en una àmplia gamma d'angles. (Rossi, CFD simulation of surfboards hydrodynamics, 2018).

### **5.3. Tipus de taules de surf**

Dins de la família de les taules de surf es pot trobar gran varietat de formes. En la *Figura 16*, es presenten les 9 formes principals, cadascun dirigida a estils de surf, tipus d'onades i surfistes de nivells diferents. Els tipus de taules que es troben en la figura són els següents: *Stand Up Paddle Surf*, *Longboard*, *Gun*, *Malibu*, *Evolutiva*, *Shortboard*, *Retro*, *Fish* i *Tow-In*. Aquestes taules i una d'innovadora, s'anitzaran i s'explicaran detalladament a l'apartat d'anàlisi del present treball. Cal clarificar que la innovadora no forma part de la llista dels tipus de taules de surf, ja que s'ha dissenyat exclusivament per aquest estudi.



*Figura 16: Diferents tipus de taules de surf [10]*

- **El Stand Up Paddle Board (SUP):** és una taula dissenyada per poder desplaçar-se de peu en tot moment, tant en l'onada com fora d'ella. Són molt amples i gruixudes per poder suportar una persona de peu amb estabilitat. El surfista fa ús d'un rem per tal de propulsar-se el qual també serveix per maniobrar en l'onada.



*Figura 17: Stand Up Paddle Board [10]*

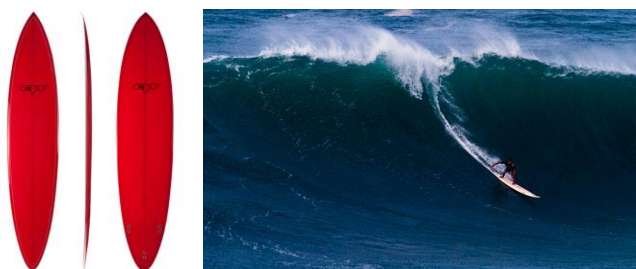
- **El longboard:** és una taula inspirada en les primeres taules hawaianes, les que s'usaven als començaments de l'expansió del surf. És ideal per onades petites i mitjanes. També s'utilitzen per onades grans però, si el surfista té experiència. S'usen per a un tipus de surf amb maniobres característiques d'aquest tipus de taula.



*Figura 18: Longboard [10]*

- **Gun:** aquestes taules tenen la punta i cua afilades. Estan especialment dissenyades per fer surf en onades grans. Acostumen a ser més llargues a mesura que sigui més gran la mida de les onades on es vol fer surf. Aquest disseny de taula llarga i afilada permet accelerar i agafar velocitat en onades grans, alhora que mantenen una gran estabilitat gràcies al seu volum.





*Figura 19: Gun [10]*

- **Malibu:** es tracta d'una taula gran de punta arrodonida, una mica més petita i maniobrabable que un *longboard*. Té bona flotabilitat el que les fa estables i de remada fàcil. És una bona opció per iniciar-se al surf o per als dies d'onades petites i fofes. Aquest tipus de taula permet fer també algunes de les maniobres típiques del *longboard*.



*Figura 20: Malibu (Mini-Longboard) [10]*

- **Evolutiva:** aquesta és la millor opció per iniciar-se al surf, ja que són més grans i gruixudes que les shortboards i tenen la punta lleugerament arrodonida, el que li dóna estabilitat i flotabilitat, alhora que una maniobrabilitat acceptable per als novells. El seu disseny fa que sigui més fàcil remar i fer surf les onades des del primer dia.



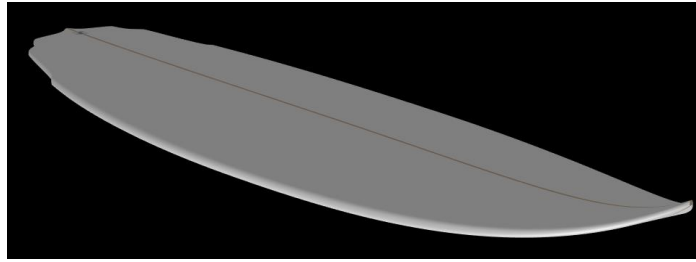
*Figura 21: Taula evolutiva [10]*

- **La shortboard:** és el tipus de taula més comú i amb el disseny més evolucionat. Són versàtils ja que ofereixen un bon equilibri entre velocitat i maniobrabilitat. Serveixen per a totes les condicions d'onades. És el tipus de taula més tècnica.



*Figura 22: El surfista Julian Wilson amb una shortboard [10]*

- **Shortboard Innovadora:** per començar amb l'explicació cal dir que aquest model s'ha dissenyat només i únicament per aquest treball. Així doncs, no entra dins la llista de les diferents taules de surf. S'ha pres de base el model de la taula estàndard anterior. No obstant això, s'ha canviat la forma de la cua de la taula. S'ha volgut estudiar els resultats de la simulació d'una taula amb les mateixes dimensions que l'anterior però, canviant la cua per una que, s'havia suposat més aerodinàmica. Per tant, al *SolidWorks* s'ha creat una nova forma inspirada en la Sci-Fi de l'article de Ricardo Rossi [1].



- **La retro:** és una taula curta inspirada en els dissenys dels anys 70, amb formes que poden resultar una mica estranyes. Són gruixudes, amb molta superfície a la part davantera, poca corba, i bastant curtes. Es poden trobar amb cua d'oreneta o pin i, poden tenir des de 1 a 4 quilles. Es necessita un nivell mitjà per treure-li tot el suc a les retro, i es mouen millor en onades petites o mitjanes amb poca força.



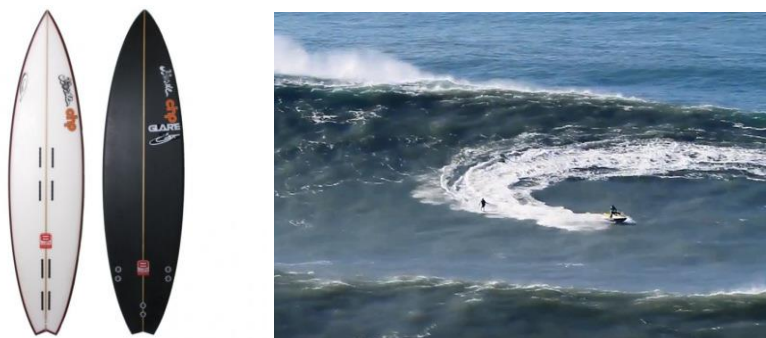
*Figura 23: Taula retro [10]*

- **La fish:** és un tipus de taula dissenyada per onades petites i mitjanes amb poca força. Són amples i amb poca corba. També són molt maniobrables gràcies a que són curtes i tenen cua d'oreneta. En ser una mica més gruixudes que les *shortboard* tenen una bona flotabilitat, el que facilita la remada. Aquest tipus de taula no funciona bé en onades grans. Les *fish* i les *retros* poden ser bastant semblants.



*Figura 24: Taula Fish [10]*

- **Les *tow-in*:** són taules dissenyades per agafar onades remolcats per moto aquàtica. Són les més petites i estretes, i porten *footstraps* per mantenir la taula enganxada als peus en tot moment, aconseguint així un gran control en les maniobres i estabilitat en onades grans. Es necessita un nivell alt i molta pràctica per dominar aquest tipus de surf, i per descomptat a algú que remolqui amb la moto aquàtica.



*Figura 25: Tow-in surfboard [10]*

## **6. Anàlisis del model 3D per Riccardo Rossi**

### **6.1. Riccardo Rossi i CFD**

Ricardo Rossi va estudiar a la Universitat de Bolonya el Màster en Enginyeria Mecànica i, posteriorment va dur a terme el Doctorat en Termo-Fluid Dinàmica. Rossi és un expert en l'àrea de la Dinàmica Computacional de Fluids (CFD). De fet, ha fundat l'empresa RED Fluid Dynamics (l'any 2016) després de ser un dels caps del Laboratori de dinàmica computacional de Fluids a la Universitat de Bolonya i, d'haver treballat com a professor al Centre de Recerca de Turbulència de la Universitat de Stanford.

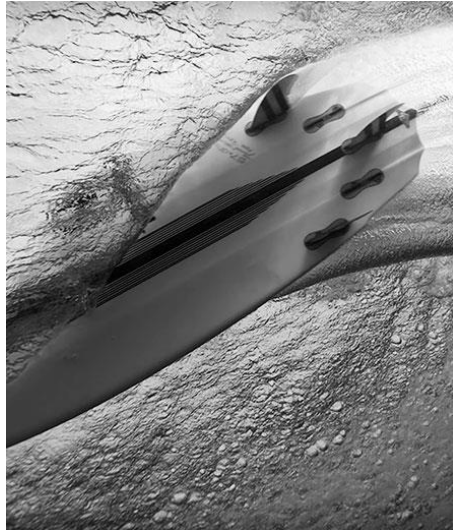
La Dinàmica Computacional de Fluids és una tecnologia dissenyada en l'àrea de l'aerodinàmica i la hidrodinàmica, on els models informàtics s'utilitzen per simular fluxos de fluids en un entorn virtual a partir d'un model CAD. Mitjançant aquest programa, és possible explorar el comportament de les taules de surf i establir el rendiment de nous models abans de ser construïts, permetent així millors dissenys, un menor temps de desenvolupament i fins i tot, una petjada ambiental reduïda gràcies a la menor necessitat de material per a la realització de proves amb productes reals.

Els mapes de distribucions del flux, pressió i velocitat, forces hidrodinàmiques, etc... són paràmetres de dinàmica de fluids que influeixen en el rendiment de cada taula de surf. Tots ells es poden visualitzar i avaluar dins de l'entorn virtual del CFD abans de dur a terme conformació de la taula, donant als dissenyadors la possibilitat de ser més creatius en aquest àmbit.

### **6.2. L'anàlisi del tail o cua**

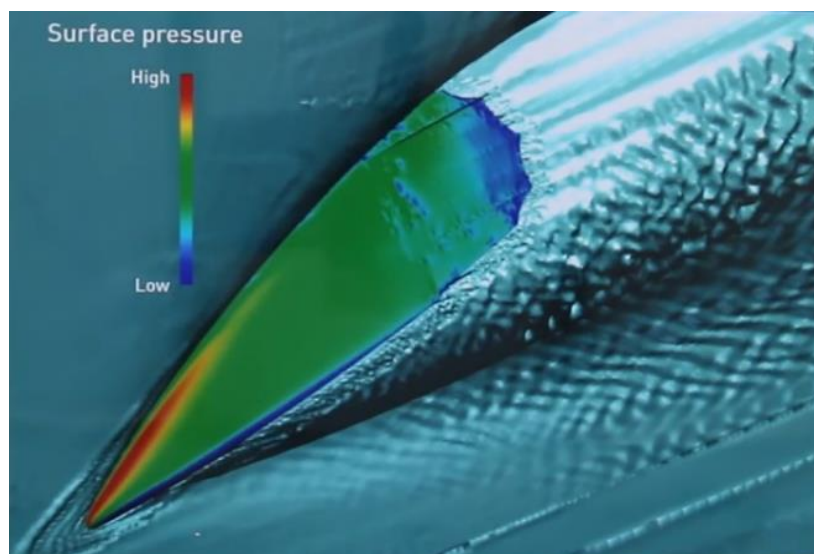
Rossi explicava en el vídeo publicat per la revista *Stab*, la seva recerca sobre el funcionament analític de les taules de surf en funció del *rocker*, del *tail*, de la velocitat del fluid, de la forma de la taula, etc. A continuació s'ha explicat breument l'estudi del científic.

En primer lloc, s'ha començat duent a terme l'anàlisi de la *Figura 26*. Una foto trobada a la revista *Surfer Magazine*, molt coneguda en el món del surf, on s'ha vist clarament la direcció que pren el flux d'aigua recorrent la cua de la taula de surf, tal i com tenia en ment el dissenyador Daniel Thomson. Així, s'ha comprovat la important relació que hi ha entre la creativitat i la tecnologia en aquest àmbit.



*Figura 26: Kelly Slater Top turn a CloudBreak  
(The Surfer Magazine)*

En segon lloc, s'ha analitzat en detall la *Figura 26* mitjançant l'estudi del camp de pressions simulat amb el software CFD. Per començar, s'han observat els gradients de pressió de la *Figura 27*. El color vermell que hi apareix a l'esquerra de la imatge fa referència a les pressions altes mentre que a la dreta de la imatge, de color blau fosc, s'hi aprecia la pressió atmosfèrica. Aquests gradients de pressions estan molt relacionats amb la curvatura del *rocker* a la cua de la taula. A més, degut al disseny que té el *Rail*, hi apareix una línia de baixa pressió al llarg d'aquest. Aquesta última part, s'ha explicat detalladament en l'apartat 6.3.



*Figura 27: Distribució de pressions en el Top Turn [2]*

### **6.3. L'estudi dels Rails**

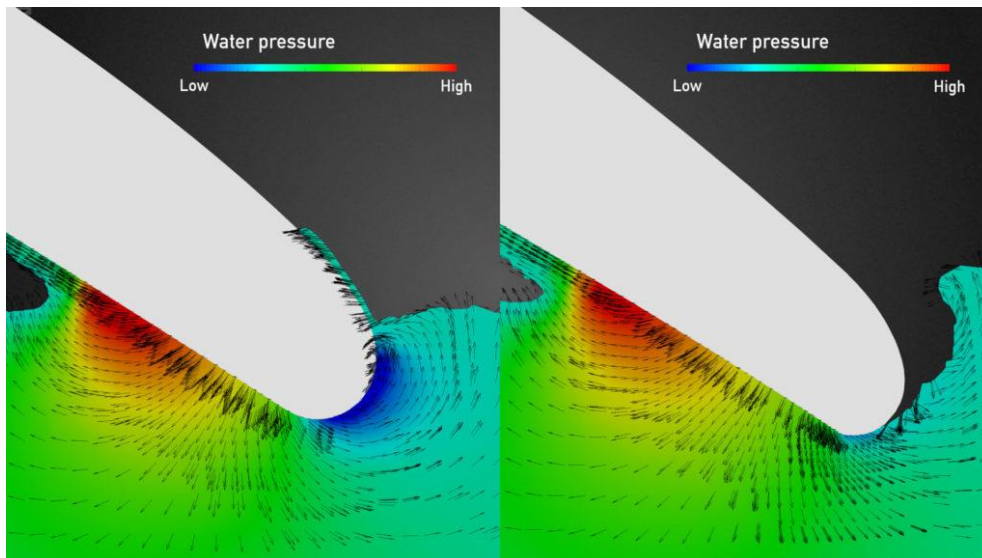
Pel que fa a la comparació dels *Rails*, s'ha analitzat la *Figura 28*. Així, s'ha estudiat el gir del surfista amb una taula que té un *Rail* més pronunciat que l'altra. Per altra banda, cal remarcar que el *bottom* de la taula de la dreta és més còncav que el de l'esquerra. La taula de l'esquerra és l'anomenada Omni, un dels dissenys del surfista Kelly Slater, mentre que la de la dreta és una Sequoia, un model italià de taula estàndard.

El que passa en la *Figura 28* és que el flux d'aigua, en la imatge de l'esquerra, és capaç d'envoltar el *Rail*. Aquest fet és degut al seu disseny llis i suau. S'hi observa, de color blau fosc, una disminució important de la pressió en la zona del *Rail* provocant que el flux en aquell punt augmenti la seva velocitat. Així, s'ha observat que hi apareix succió en la zona de color blau fosc. No obstant això, en la imatge de la dreta a causa del disseny més còncav i a causa del *Rail* més pronunciat, es crea un gradient de pressions advers provocant que l'aigua no pugui resseguir el recorregut de la curvatura. Per tant, no hi apareix el mateix flux accelerat i així doncs, no s'hi observa la succió present en la taula de l'esquerra.

Per tant, aquesta imatge no representa quina taula és millor sinó que amb ajuda del CFD s'arriba a un coneixement més profund de com interacciona el flux amb la taula. Així, si el



que es vol és tenir més lleugeresa i facilitat a l'hora de produir una traça en l'onada es preferirà el *Hard Rail*. Mentre que, si el que es vol és notar la taula més connectada amb l'onada i més velocitat es preferirà un *Soft Rail*.

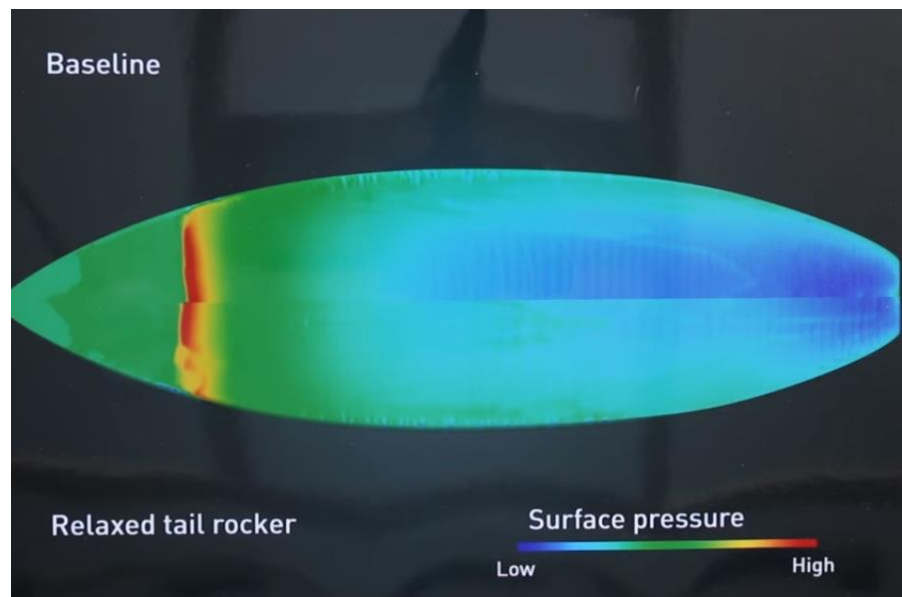


*Figura 28: Efecte i comparació del flux d'aigua mitjançant el camp pressions en el Rail durant una corba en l'onada. S'ha comparat un Rail amb curvatura suau (esquerra) amb un de curvatura agressiva (dreta). [2]*

#### **6.4. L'anàlisi del Tail Rocker o curvatura de cua**

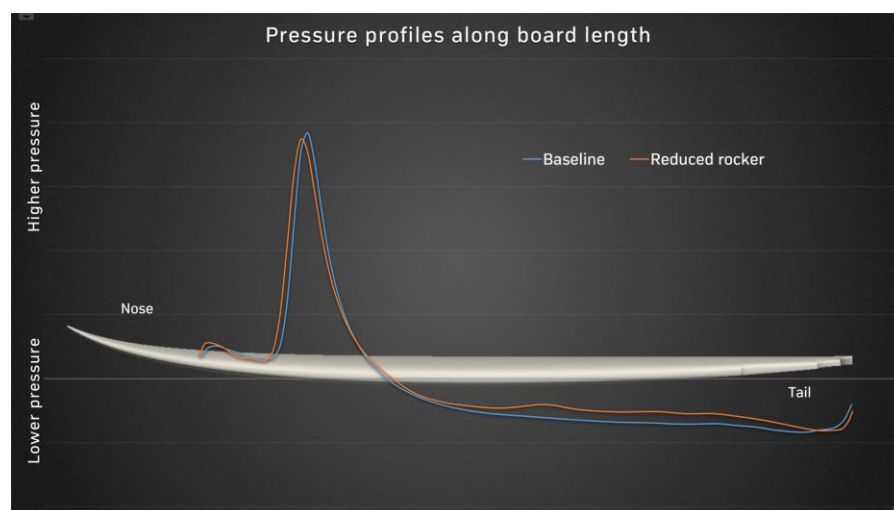
Pel que fa al *rocker* en el tail de la *Figura 29*, s'ha comparat una taula amb un *rocker* estàndard a la cua (la de dalt de la imatge) amb una altra amb menys *rocker* (la de sota de la imatge), la diferència és de 12,7 mm. El que s'esperaria és que un canvi a la cua de la taula repercuteixi en la mateixa zona. No obstant això, s'ha vist com el flux que travessa la taula amb menys *rocker*, ho fa a menys velocitat i per tant, hi apareix més pressió al llarg de la taula. De fet, s'ha vist que la línia d'impacte de l'aigua, és a dir, on s'hi troben els punts d'estancament (punts de velocitat nul·la), apareix abans en la taula de sota que en la de dalt. Cal recordar, que l'única diferència entre una taula i una altra és el *tail*, el *nose* és igual. El que no s'esperava és que amb un canvi tan petit en el disseny d'una taula el coeficient de *lift* varia fins a un 50%.





*Figura 29: Comparació del Rocker Tail [2]*

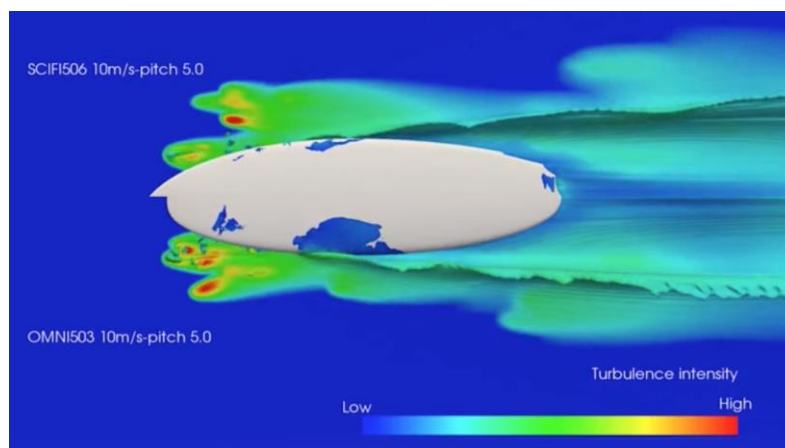
Pel que fa al Gràfic 1, s'ha estudiat la pressió en funció de la longitud de la taula comparant simultàniament els valors per a una taula estàndard i una altra amb la curvatura de la cua menys pronunciada. Tal com s'ha explicat a l'anterior paràgraf, s'ha verificat que el pic de màxima velocitat es presenta abans en la taula de *rocker* reduït que en l'estàndard. Per altra banda, s'ha observat com en tot moment la taula amb menys *rocker* presenta més pressió al llarg de la seva longitud.



*Gràfic 1: Anàlisi de l'efecte de la curvatura del rocker pel que fa a la pressió de l'aigua al llarg de l'ànima de la taula. [2]*

## 6.5. Turbulència del fluid al voltant de la taula

A la *Figura 30* es mostra la meitat d'una taula tipus Omni (taula de sota) i l'altra meitat tipus Sci-Fi (taula de dalt). La dinàmica computacional de fluids també aporta informació sobre la turbulència del flux al voltant de la taula. Com més gran sigui aquesta turbulència, més gran serà el coeficient *drag* i conseqüentment, menys velocitat tindrà el surfista. En aquesta imatge, s'ha vist clarament el recorregut que pren l'aigua al voltant de la taula. Mitjançant la *Figura 30*, s'ha apreciat com en la taula Omni l'aigua ressegueix a la perfecció el seu perfil. De fet, la turbulència del flux és major a la taula de sota que a la de dalt. El motiu és que el disseny d'aquesta última a la cua és una mica més complex, els seus canals provoquen menys turbulències, ja que el flux segueix una mateixa direcció mentre que a la Omni, apareix una nova component de velocitat que provocarà l'aparició de més turbulència. Així doncs, la taula Sci-Fi tindrà menys *drag* i, conseqüentment serà un model més ràpid que la Omni.



*Figura 30: Turbulència al voltant de la taula Sci-Fi i Omni [2]*

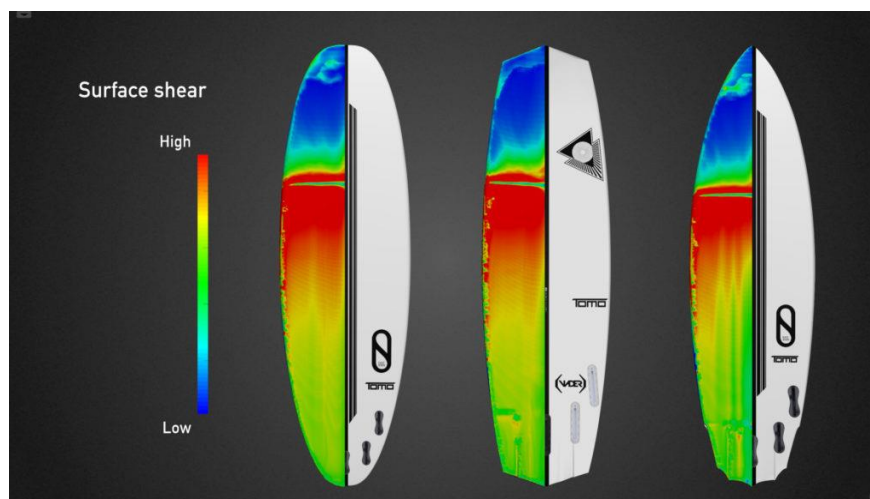
## 6.6. Comparació dels perfils variant la velocitat

En relació a la *Figura 31*, s'ha assumit el descens recte de l'onada. Se sap que el funcionament de cada taula de surf varia en funció de la velocitat. Aquest estudi, s'ha centrat en les forces de fricció que provoca l'aigua sobre la taula.

Pel que fa a la Sci-Fi, es pot observar el clar l'efecte dels canals en la distribució de la fricció. Així, si s'observa la cua, es pot apreciar que aquest model presenta menys fricció que els altres. De fet, té sentit en relació a l'apartat anterior, ja que s'ha vist que aquest model aporta més velocitat al surfista.

Pel que fa al model Vader, s'ha observat com aquest presenta menys *drag* a baixa velocitat però, quan s'augmenta la velocitat, té més *drag* que una Omni. No obstant això, una Omni a elevada velocitat té menys *drag* però, a velocitats baixes en té més. Per tant, la Vader és més eficient a velocitats baixes que la Omni i viceversa.

Concloent, s'ha de saber com actua cada tipus de taula en les diferents condicions perquè no existeix una millor taula sinó que per a cada condició o habilitats del surfista serà més útil un model o un altre.



*Figura 31: Comparació de la força de drag causada per la fricció en els models (d'esquerra a dretra) OMNI, Vader i SciFi. [2]*



## **7. Fase de simulació: anàlisi del diversos models de taules de surf en 2D**

### ***7.1. Consideracions per a l'anàlisi:***

Per començar amb la simulació, s'han fixaran unes condicions de contorn específiques que es consideraran constants al llarg de tot el procés.

S'ha pres un angle d'atac de  $0^\circ$  perquè s'ha considerat només el descens de l'onada completament vertical. Així doncs, com que s'està fent un estudi en 2D d'un cos simètric té sentit parlar del coeficient de sustentació, ja que serà nul.

S'ha decidit que la velocitat del fluid és de 5 m/s després d'haver fet un estudi exhaustiu sobre la velocitat mitjana i màxima que arriba un surfista. Així doncs, aquesta velocitat és relativa, és a dir, s'ha considerat que la taula està quieta i el que es troba en moviment és l'aire fent així, un experiment del tipus "túnel de vent".

S'ha consensuat amb l'enginyer Riccardo Rossi que si es feia l'estudi amb un sol fluid, l'aire aportaria més informació a l'hora de fer la comparativa que l'aigua. Tanmateix, cal recordar que els valors obtinguts per si mateixos no tenen cap valor.

Tanmateix, cal esmentar que no s'han estudiat les línies de corrent per al model 2D, ja que no aporten informació addicional a les figures dels camps de vectors velocitat ni s'aprecien correctament els remolins creats pel deixant.

Pel que fa a la pressió, s'ha negligit l'efecte de la profunditat, suposant-la així d'una atmosfera. I, s'ha escollit el valor de densitat de l'aire de  $1,225 \text{ Kg/m}^3$ .

S'ha considerat que l'aire és un fluid incompressible ja que es troba en un règim subsònic.

L'estudi s'ha fet en règim estacionari, ja que s'estudia el comportament de manera invariable en el temps.

El flux és turbulent així, el model emprat és el de K-Epsilon, donat que proporcionava uns resultats similars als obtinguts mitjançant el model SST (Shear Stress Transport) però amb menor temps de càlcul.

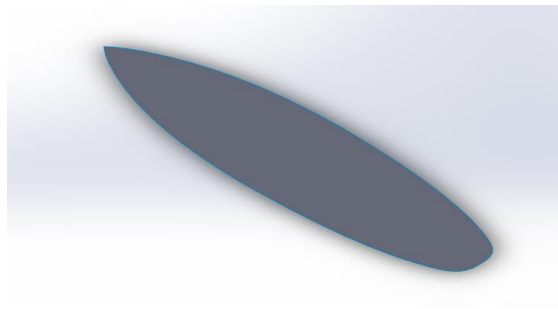
## **7.2. Procediment que s'ha seguit fins extreure els resultats**

Per comparar els efectes dels canvis geomètrics en el rendiment de les taules de surf s'ha realitzat una simulació mitjançant el software de simulació Ansys FLUENT. S'han utilitzat les tècniques del CFD, per a la determinació del coeficient de *drag* alhora que per analitzar els camps de pressions i velocitats de cada model estudiat. Per tal de dur a terme aquestes simulacions cal seguir un procediment estricte en el qual es distingeixen diverses fases. Seguidament s'explicarà amb detall el procediment seguit a cada etapa. Com que totes les simulacions s'han realitzat de la mateixa manera, a continuació es mostra una sola vegada tots els passos corresponents a la simulació de la *Taula shorboard* estàndard.

### **7.2.1. Fase inicial**

En aquesta fase inicial s'ha creat la geometria en 2D d'estudi. Primer, s'ha buscat el model de taula de surf que es vol estudiar a la pàgina web [4]. En total han estat 10, els 9 models diferents de taules de surf i una d'innovadora creada exclusivament per aquest projecte.

Posteriorment, s'ha baixat del lloc web [4] el plànol de la taula i, s'ha dibuixat el perfil amb ajuda del SolidWorks. Un cop dibuixada la superfície, s'ha guardat en el format IGES per tal de dur a terme la següent fase, el *Pre-procés*.



*Figura 32: Superfície de la taula estàndard creada amb SolidWorks*

### 7.2.2. Pre-procés

Per començar, s'ha obert el Ansys Fluent i s'ha creat un nou fitxer. En primer lloc, s'ha obert el Design Modeler, el creador de la geometria de l'Ansys. En segon lloc, s'ha importat la superfície de la taula dibuixada prèviament (en format IGES) on se li ha afegit un volum de control. Mitjançant un booleà s'ha obtingut el negatiu de l'objecte, ja que és per on circularà el fluid d'estudi i on el software de simulació calcularà les velocitats i les pressions. Cal que el volum de control sigui suficientment gran per tal de tenir resultats coherents i que no afecti el comportament del flux. S'han decidit unes dimensions D1 i H2 de 10m, corresponents al diàmetre de la circumferència i a la llargada del VC.

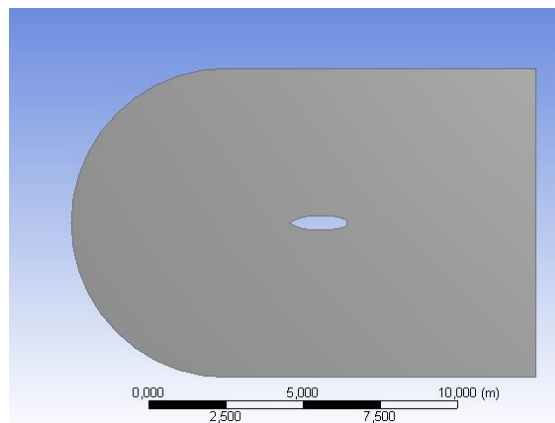


Figura 33: Geometria per a la simulació de la Taula Estàndard

Després, s'ha posat nom a les superfícies creades per tal de que el software de simulació les reconegui (inlet, outlet, border i taula) fent ús de l'eina "Named Selection".

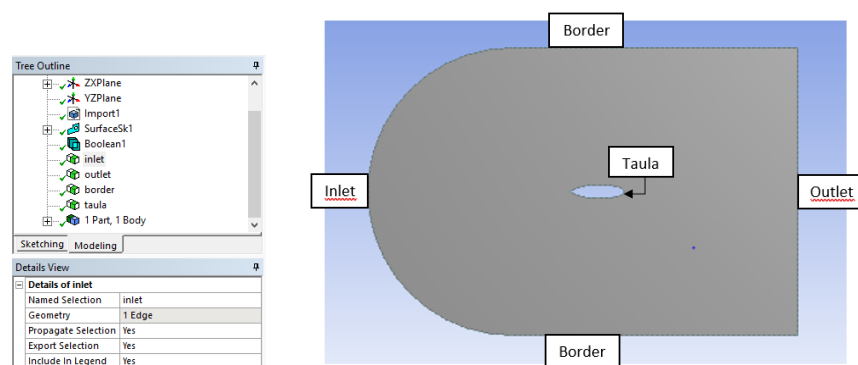
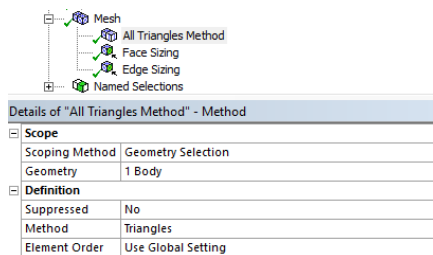


Figura 34: Parts del volum de control segons les condicions de contorn

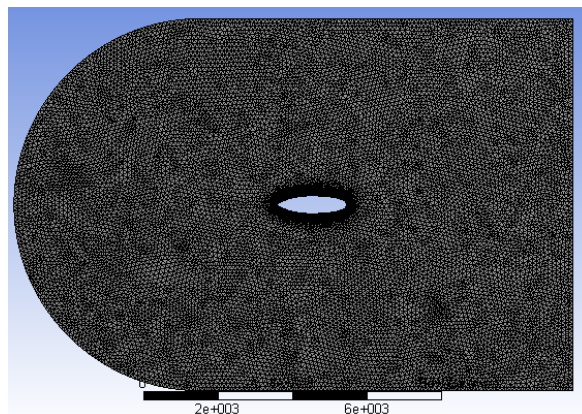
Seguidament, en aquesta fase s'ha de dur a terme el mallat que consisteix en la discretització de la geometria en elements i nodes. És un pas molt important, ja que la solució serà més precisa com més fi sigui aquest. Però, una bona solució pot arribar a portar molt temps de càlculs. Per tant, s'haurà de trobar un punt òptim entre temps de realització del mallat i validació del resultat obtingut.

Així doncs, s'ha procedit a l'apartat l'Ansys *Meshing*. Per fer-ho, s'ha realitzat la definició del mallat mitjançant *Mesh Control, Method*. S'ha emprat elements triangulars en comptes de rectangulars, donat que s'ajusten millor a les geometries irregulars.



*Figura 35: Mètode del mallat: tot triangles*

Tot seguit, s'ha ajustat la mida de la malla i la qualitat d'aquesta per tal de que sigui el més precís possible. Els resultats dels elements i nodes obtinguts de cada taula, trobant aquest punt òptim, es troben a l'annex, *Taula 7*.

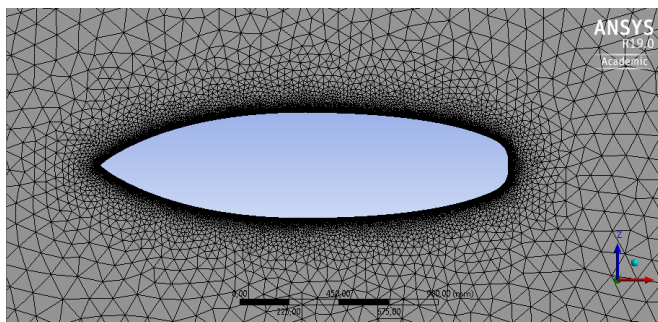


*Figura 36: Mallat de la taula estàndard*

Com es pot apreciar a la *Figura 36*, el mallat prop de la superfície de la taula és més petit i per tant més precís, perfectament ajustat a tot el seu contorn. Com més s'allunya de la superfície del cos, es va fent més gran donat que els resultats en zones allunyades del perfil no cal que siguin tant precisos. Aquesta part s'ha realitzat utilitzant l'eina *Sizing* del



*Mesh*. S'han ajustat les mides del mallat en tota la superfície del fluid i del perfil de la taula de surf. Així, mitjançant l'eina *Face Sizing* i *Edge Sizing* s'ha aconseguit augmentar la precisió del mallat al voltant del VC i del perfil estudiat, respectivament. De fet, s'ha utilitzat una mida d'element de 0,08 mm a la superfície i de 0,01mm al contorn del perfil.

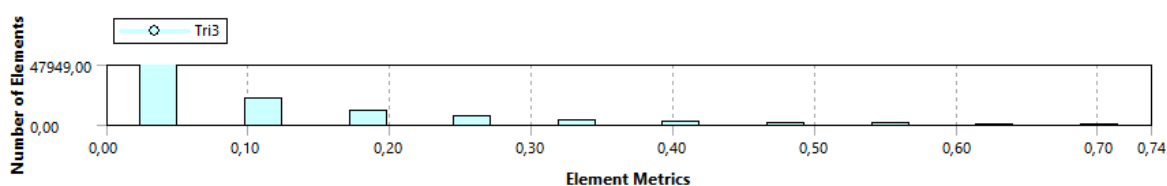


*Figura 37: Mallat al voltant del perfil de la taula de surf*

Per comprovar la qualitat de la malla, s'ha d'adreçar a l'apartat *Mesh, Quality* i seleccionar *Skewness* a *Mesh Metric*. Els resultats són els que es mostren a les figures: *Figura 38* i *Figura 39*.

Mesh Metric	Skewness
Min	5,4793e-009
Max	0,73765
Average	0,11202

*Figura 38: Mínima, màxima i mitjana de Skewness*



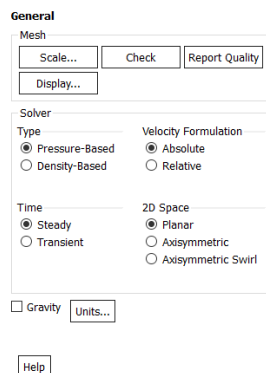
*Figura 39: Nombre d'elements per cada Skewness*

Com es pot observar, la mitjana d'*Skewness* a tota la malla és molt baixa i la majoria d'elements tenen el mínim valor d'*Skewness*. Per tant, és raonable pensar que els resultats obtinguts són prou bons.

### 7.2.3. Definició del Set-Up

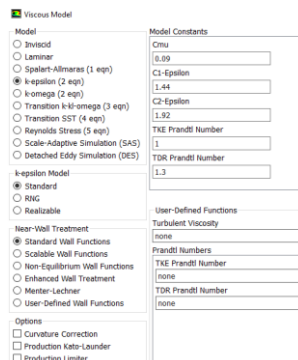
A continuació, s'ha obert la finestra de *Set-Up* i s'han configurat totes les condicions i els paràmetres adequadament en l'ordre que apareixen al menú.

En primer lloc, a la part de *General*, s'ha definit si el problema és estacionari (*Steady*) o transitori (*Transient*).



*Figura 40: Paràmetres apartat General*

En segon lloc, a la part de *Models*, s'ha seleccionat el model de turbulència adequat. S'ha escollit el model de turbulència *k-epsilon*. El tractament de paret que es farà (Near-wall treatment) serà un *Standard Wall Functions*, que és el corresponent a un  $y^+ = 50$  (capa límit turbulenta).



*Figura 41: Tipus de Model*

Dins de material no s'ha de canviar res ja que per defecte està seleccionat l'aire amb les seves propietats adients. En l'apartat *Boundary Conditions*, s'ha definit la velocitat del flux d'aire a l'entrada de 5 m/s i, perpendicular a la paret. A la sortida s'ha establert una pressió constant de 0 Pa. Per altra banda, mitjançant les condicions de contorn s'ha indicat que la taula no es mou sinó que és l'aire qui ho fa. Finalment, al border s'ha establert la condició

de velocitat relativa del flux nul·la. D'aquesta manera s'ha creat una superfície sense esforços tallants.

Més a baix, a *Reference Values*, s'han introduït les característiques pròpies de cada taula: àrees, longituds, etc.

Reference Values	
Compute from	inlet
Reference Values	
Area (m2)	0.68
Density (kg/m3)	1.225
Depth (m)	1
Enthalpy (J/kg)	0
Length (m)	1.85
Pressure (pascal)	0
Temperature (K)	288.16
Velocity (m/s)	5
Viscosity (kg/m-s)	1.7894e-05
Ratio of Specific Heats	1.4

*Figura 42: Reference Values*

Finalment, a *Monitors* s'ha creat la nova variable  $C_D$ , és a dir, el monitor del coeficient de *Drag* per al seu posterior càlcul.

## 7.2.4. Resolució

A continuació, s'ha d'inicialitzat els càlculs (mitjançant el tipus *Hybrid Initialization*) i s'ha començat a realitzar les iteracions (fent ús de l'apartat *Run Calculation*).

**Solution Initialization**

Initialization Methods

☒ Hybrid Initialization

☐ Standard Initialization

[More Settings...](#) [Initialize](#)

**Run Calculation**

[Check Case...](#) [Update Dynamic Mesh...](#)

Number of Iterations: 1000

Reporting Interval: 1

Profile Update Interval: 1

[Data File Quantities...](#) [Acoustic Signals...](#)

[Calculate](#)

*Figura 43: Inicialització i Càlculs del problema*

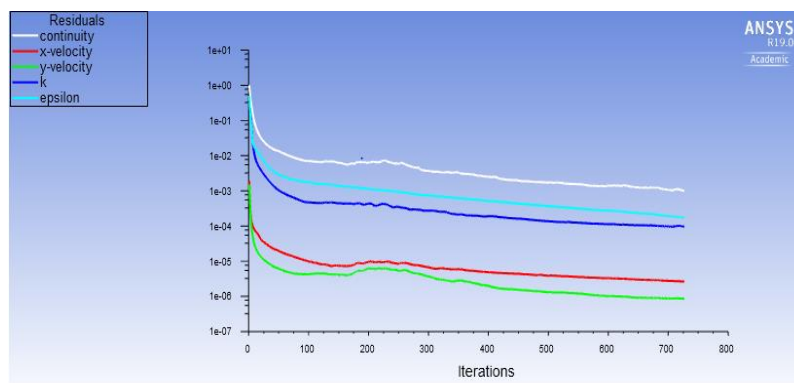
S'ha resolt el problema mitjançant l'aplicació de les equacions de la dinàmica de fluids que, s'han escollit al definir el tipus de simulació. El programa ha realitzat un procés iteratiu per al càlcul de les solucions de cada node, partint d'uns valors inicials. Quan les diferències entre dues solucions, també anomenades residus, són suficientment petites es considera que la solució ha convergit i que per tant s'ha arribat a la solució final.

Pel que fa a la taula estàndard, la solució convergeix al cap de 727 iteracions amb un temps total d'aproximadament una hora.

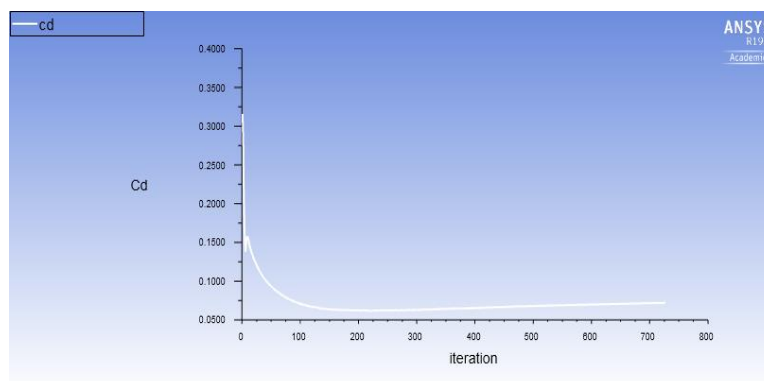
720	1.0814e-03	2.6861e-06	8.7320e-07	9.9833e-05	1.7635e-04	7.1986e-02	0:11:43	280
721	1.0677e-03	2.6782e-06	8.7132e-07	1.0021e-04	1.7825e-04	7.2005e-02	0:11:12	279
722	1.0505e-03	2.6720e-06	8.6906e-07	9.8646e-05	1.7431e-04	7.2026e-02	0:10:47	278
723	1.0366e-03	2.6653e-06	8.6705e-07	9.9119e-05	1.7650e-04	7.2055e-02	0:11:22	277
724	1.0242e-03	2.6608e-06	8.6405e-07	9.7288e-05	1.7275e-04	7.2084e-02	0:10:54	276
725	1.0126e-03	2.6554e-06	8.6103e-07	9.7513e-05	1.7497e-04	7.2102e-02	0:10:31	275
726	1.0042e-03	2.6522e-06	8.5844e-07	9.5535e-05	1.7128e-04	7.2119e-02	0:11:08	274
iter	continuity	x-velocity	y-velocity	k	epsilon	cd	time/iter	
! 727	solution is converged							
727	9.9548e-04	2.6459e-06	8.5266e-07	9.5626e-05	1.7347e-04	7.2138e-02	0:10:41	273

*Figura 44: Número d'iteracions fetes fins a la convergència dels residus*

Per altra banda, a mesura que s'han anat fent les iteracions, el programa ha anat creant dos gràfics, un per a l'evolució dels residus i l'altre per al coeficient de resistència al avanç. Els residus disminueixen en tot moment fins arribar al valor de convergència imposat prèviament de 0,001. El fet que determina si la solució ha convergit és quan tots els residus es troben per sota d'aquest valor. A continuació, s'han adjuntat ambdós gràfics i, el lloc del fluent on s'ha trobat el valor del  $C_D$  un cop han convergit els residus.



*Figura 45: Evolució dels residus*



*Figura 46: Evolució del coeficient de Drag*

### **7.2.5. Post-procés**

Per últim s'ha analitzat els resultats obtinguts mitjançant la simulació a la fase del *Post-procés*. És en aquesta fase on s'han pogut visualitzar les distribucions de velocitats i pressions per a cada taula de surf. En els següents apartats es troben els resultats obtinguts de la simulació dels diferents tipus de taules de surf.

## **7.3. Resultats dels camps de pressions i velocitats**

A continuació, es mostren les distribucions de pressions i velocitats de cada tipus de taula de surf trobades mitjançant el programa de simulació ANSYS Fluent. En cada apartat s'ha fet un petit resum del què s'ha observat en cada imatge. En acabar, s'ha fet una taula resum de tots els coeficients de resistència a l'avanç trobats en cada simulació, ja que no té sentit estudiar el valor per si mateix però si, fent una comparativa entre ells. A l'annex s'ha adjuntat una taula on s'indica la quantitat d'elements i nodes que s'han emprat. Seguidament a aquest apartat, s'han dut a terme diferents comprovacions on s'ha qüestionat la certitud dels resultats de les simulacions.

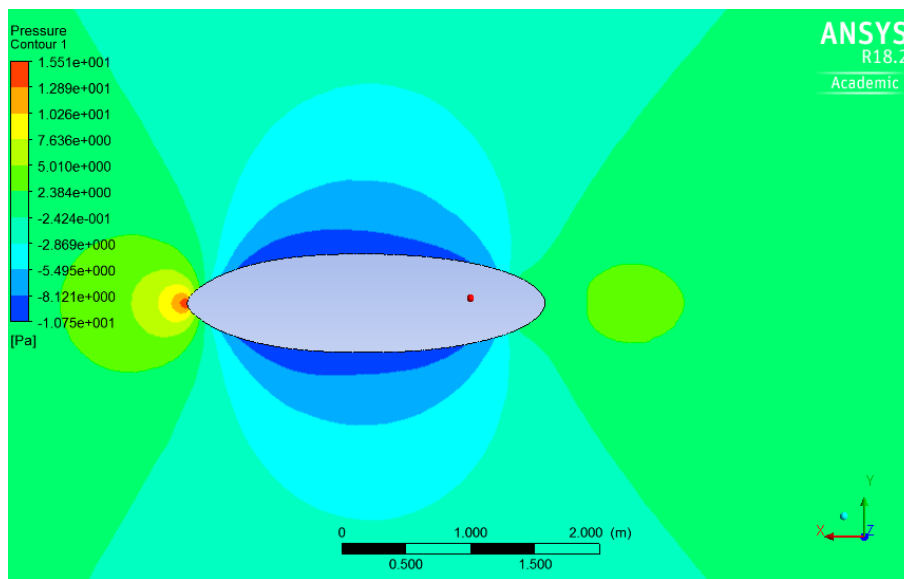
### **7.3.1. SUP**

#### **Camp de pressions:**

Pel que fa al camp de pressions (*Figura 47*), s'observa principalment el punt d'estancament, és a dir, el punt teòric de la superfície del cos on la pressió és màxima. Aquest, es troba a la punta davantera de la taula.

A més, s'observa una simetria perfecta entre la part superior i inferior de la figura confirmant així, la sustentació nul·la.

Per altra banda, és interessant veure la part del darrera de la taula on, es reconeix un increment de pressions respecte la part central de la taula, és a dir, un gradient advers de pressions, provocant així el deixant. S'ha obtingut una pressió màxima de 15,21 Pa.

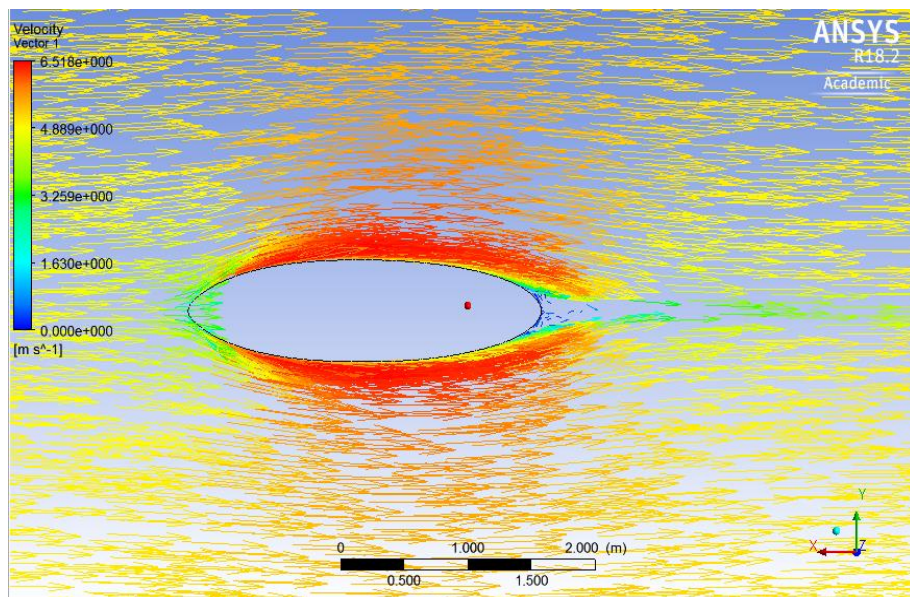


*Figura 47: Camp de pressions del SUP*

### **Camp de velocitats:**

Com es pot observar a la figura *Figura 48*, la velocitat augmenta notablement en passar per la transició de la part del *nose* a la del centre de la taula de surf. De fet, es pot observar perfectament el punt d'estancament, és a dir, el punt teòric de la superfície del cos on la velocitat és nul·la, i per tant, la pressió és màxima. Aquest, es troba en la punta davantera de la taula. La velocitat màxima mesurada és de 6,518 m/s. Així doncs, tal i com s'observa en la llegenda, es representa de color vermell.

Per altra banda, en aquesta distribució s'observa clarament el deixant. Aquest, és representat en colors blaus i verds, ja que són els colors que s'indiquen a la llegenda per velocitats baixes. Així doncs, té sentit ja que el fluid forma aquests remolins creats pel gradient advers de pressions.

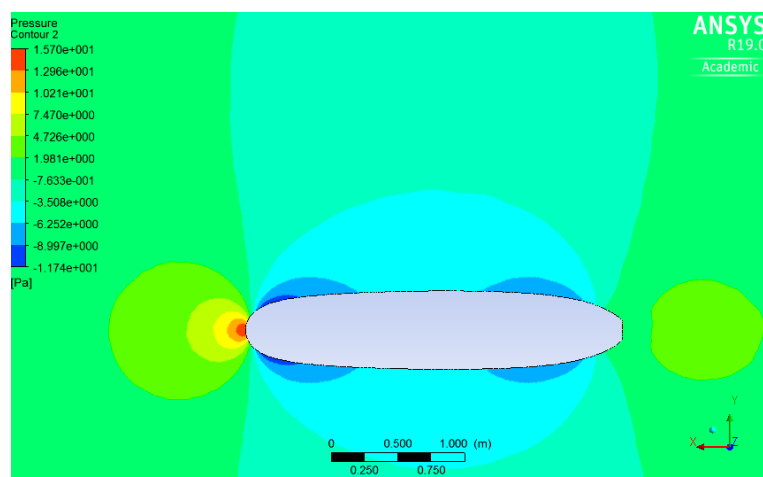


*Figura 48: Camp de velocitats del SUP*

### **7.3.2. Longboard**

#### **Camp de pressions:**

Pel que fa al camp de pressions, s'observa principalment el punt d'estancament a la part davantera de la taula. A més, s'observa una simetria perfecta entre la part superior i inferior de la figura confirmant així, la sustentació nul·la. Tanmateix, es reconeix el deixant a la part del darrera de la taula. En aquesta taula, a causa de la seva llargària s'aprecia com la capa límit es desprèn dues vegades. S'ha obtingut una pressió màxima de 15,7 Pa.

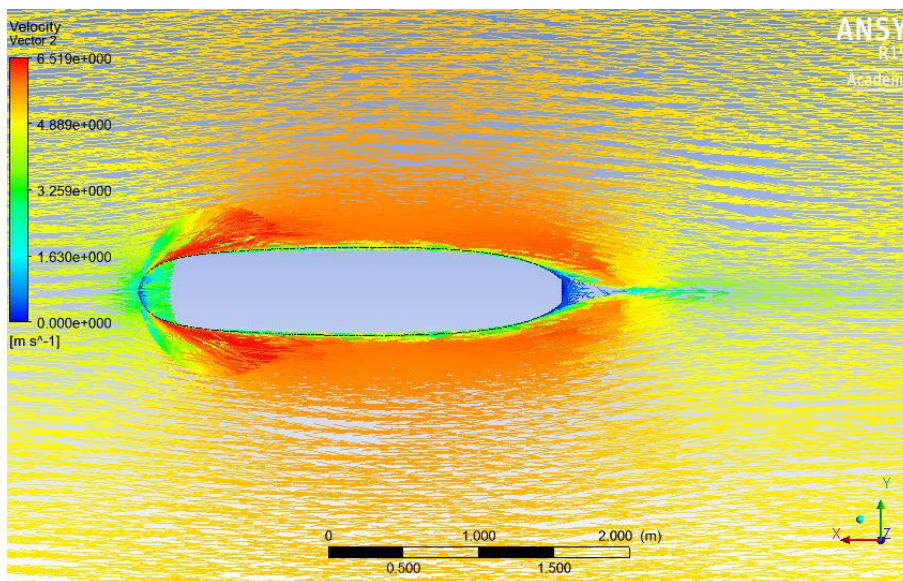


*Figura 49: Camp de pressions del longboard*



### **Camp de velocitats:**

Com es pot observar a la figura següent, la velocitat del fluid augmenta notablement en passar per la transició de la part del *nose* a la del centre de la taula de surf. De fet, es pot observar perfectament el punt d'estancament on la velocitat és mínima a la punta davantera de la taula. La velocitat màxima mesurada és de 6,519 m/s, es representa de color vermell. Per altra banda, en aquesta distribució s'observa clarament el deixant provocant velocitats gairebé nul·les, en colors blaus i verds.



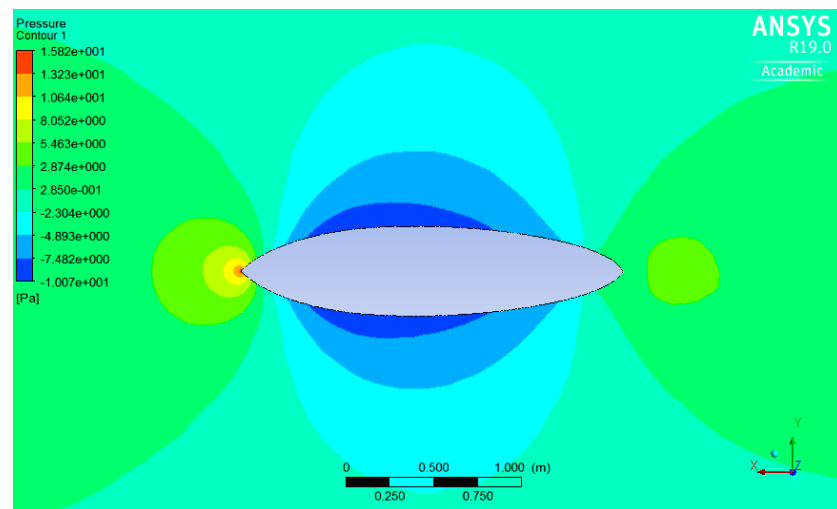
*Figura 50: Camp de velocitats del longboard*

### **7.3.3. Gun**

#### **Camp de pressions:**

Pel que fa al camp de pressions, com bé s'ha dit en les taules de surf anteriors, s'observa tan el punt d'estancament (part del davant) com el deixant (part del darrera) les quals consten de pressions màximes. La simetria del dibuix, entre la part superior i inferior de la taula, permet comprovar l'absència de sustentació. S'ha obtingut una pressió màxima de 15,82 Pa. Així, aquest valor és molt similar al de les taules de surf explicades anteriorment.

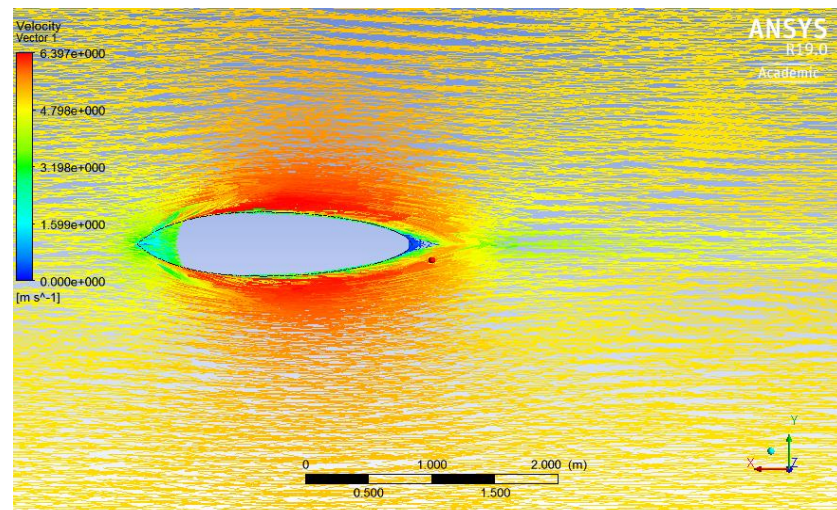




*Figura 51: Camp de pressions de la Gun*

### **Camp de velocitats:**

Així com s'ha explicat amb les taules de surf anteriors, la velocitat del fluid màxima es troba just en la transició de la part del *nose* a la del centre, on canvia la curvatura. De fet, s'observa tan el punt d'estancament (part del davant) com el deixant (part del darrera) les quals consten de velocitats mínimes. A diferència de les taules anteriors, el deixant que s'hi observa és més petit. La velocitat màxima mesurada és de 6,397 m/s.

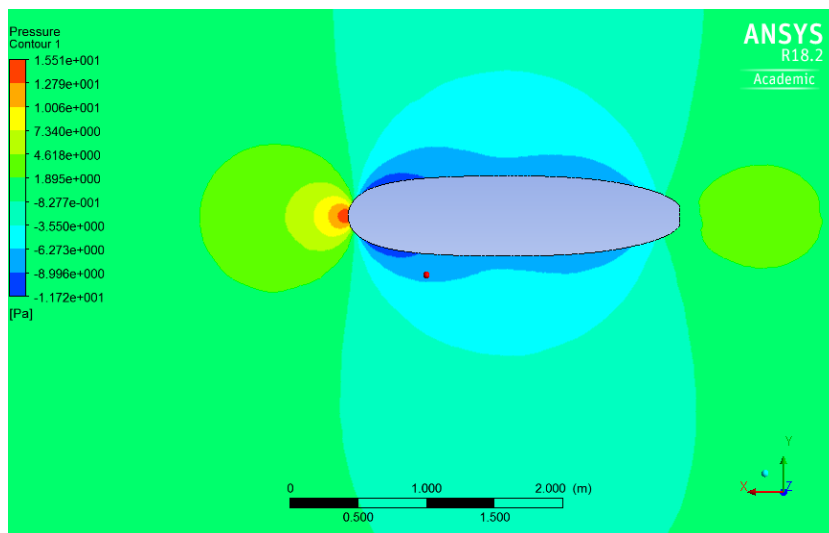


*Figura 52: Camp de velocitats de la Gun*

### **7.3.4. Malibu**

#### **Camp de pressions:**

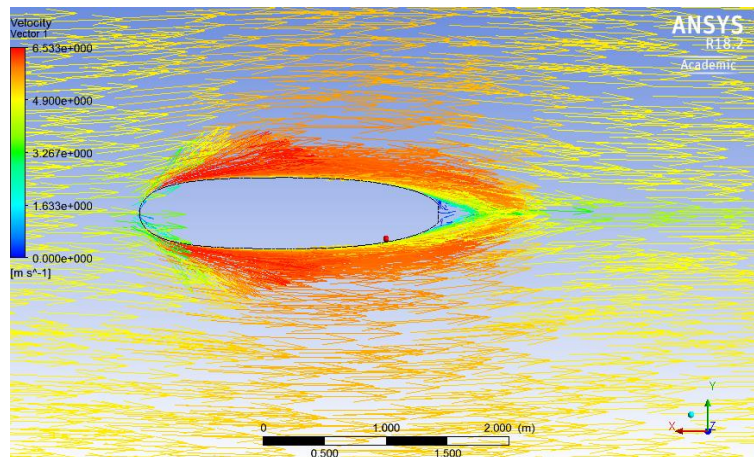
Pel que fa al camp de pressions trobats en la imatge precedent, s'arriba a les mateixes conclusions preses per les taules anteriors. No obstant això, s'ha obtingut una pressió màxima de 15,51 Pa. Tanmateix, en aquesta taula no apareix una simetria clara entre la part superior i inferior de la taula de surf de la imatge. Es creu que el motiu és que el SolidWorks no ha creat línies perfectes per a aquest perfil i així, ha afectat a la simulació. Malgrat tot, els resultats obtinguts són prou correctes, ja que es troben dins el mateix interval de valors que les altres taules de surf simulades.



*Figura 53: Camp de pressions de la Malibu*

#### **Camp de velocitats:**

Així com s'ha explicat amb les taules de surf anteriors, la velocitat del fluid màxima es troba just on canvia la curvatura del perfil de la taula. De fet, s'observa tan el punt d'estancament (part del davant) com el deixant (part del darrera) les quals consten de velocitats mínimes. El dibuix representat a continuació és molt similar al del *longboard*. No obstant això, la velocitat màxima mesurada és de 6,533 m/s mentre per al longboard era de 6,519 m/s. Així doncs, es tracta d'una diferència de velocitats de 1,4%, és a dir, pràcticament nul·la.

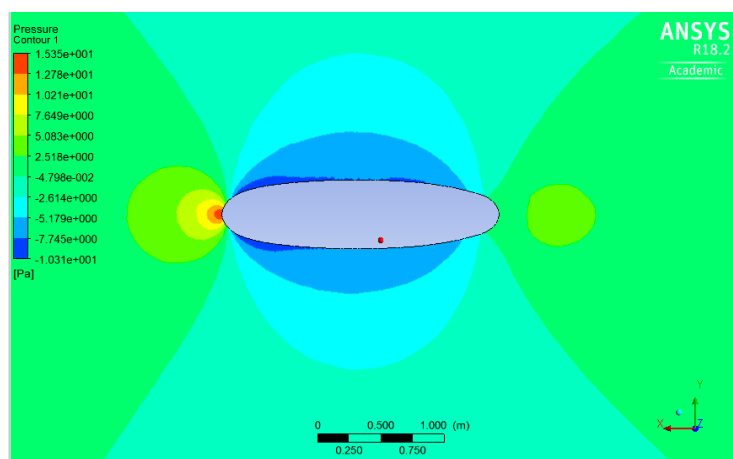


*Figura 54: Camp de velocitats de la Malibu*

### 7.3.5. Evolutiva

#### Camp de pressions:

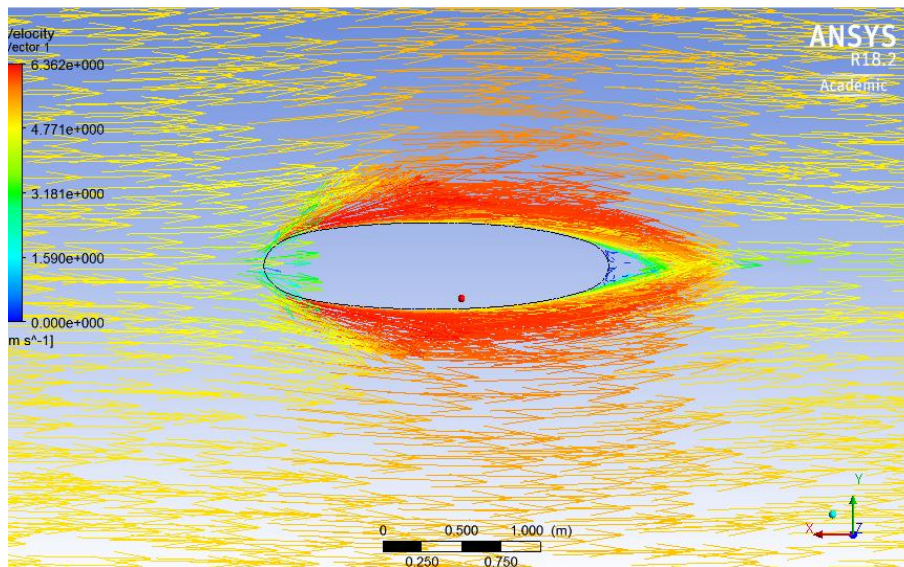
Pel que fa al camp de pressions trobats en la imatge precedent, s'arriba a les mateixes conclusions preses per les taules anteriors. No obstant això, s'ha obtingut una pressió màxima de 15,35 Pa. Tanmateix, en aquesta taula no apareix una simetria exacta entre la part superior i inferior de la taula de surf de la imatge. Es creu que el motiu és el mateix explicat anteriorment, que el SolidWorks no ha creat línies perfectes per a aquest perfil. Malgrat tot, els resultats obtinguts són prou correctes, ja que es troben dins el mateix rang de valors que per a les altres taules de surf simulades.



*Figura 55: Camp de velocitats de l'Evolutiva*

### **Camp de velocitats:**

Així com s'ha explicat amb les taules de surf anteriors, la velocitat del fluid màxima es troba just on canvia la curvatura del perfil de la taula i és de 6,362 m/s. Tanmateix, s'observa el deixant i el punt d'estancament, on es troben les velocitats mínimes.



*Figura 56: Camp de pressions de l'Evolutiva*

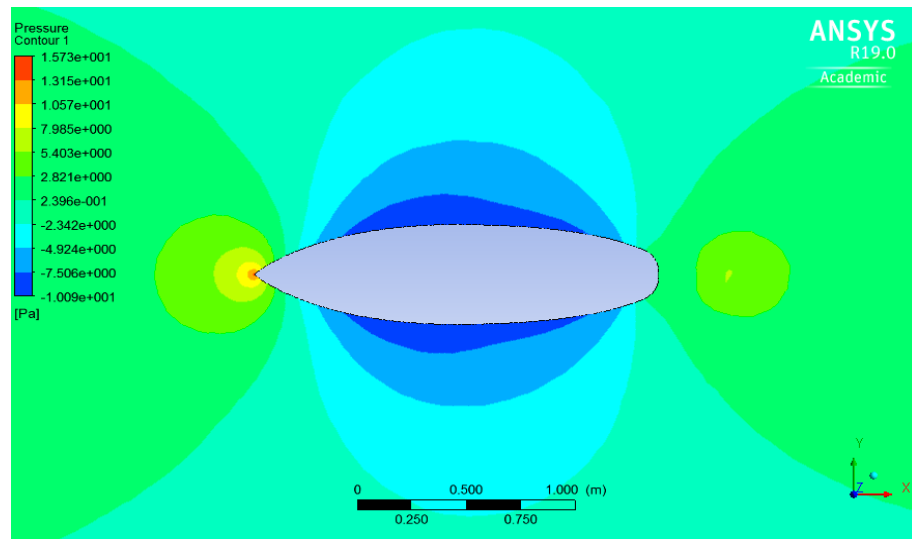
### **7.3.6. Taula shorboard estàndard**

#### **Camp de pressions:**

Pel que fa al camp de pressions se la següent figura, s'observa principalment el punt d'estancament, és a dir, el punt teòric de la superfície del cos on la pressió és màxima. Aquest, es troba a la punta davantera de la taula.

A més, s'observa una simetria perfecta entre la part superior i inferior de la figura confirmant així, la sustentació nul·la.

Per altra banda, és interessant veure la part del darrera de la taula on, es reconeix un increment de pressions respecte la part central de la taula, és a dir, un gradient advers de pressions, provocant així el deixant. S'ha obtingut una pressió màxima de 15,73 Pa.



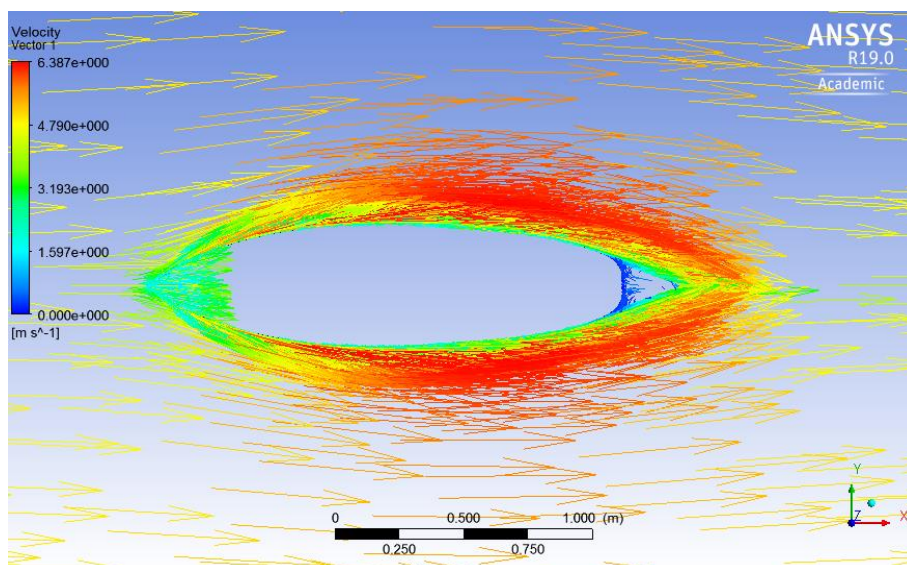
*Figura 57: Camp de pressions de la taula estàndard*

### **Camp de velocitats:**

Com es pot observar a la figura precedent, la velocitat augmenta notablement en passar pel canvi de curvatura del perfil. De la mateixa manera, en aquest punt es troba la velocitat màxima mesurada que és de 6,387 m/s. De fet, es pot observar perfectament el punt d'estancament, és a dir, el punt teòric de la superfície del cos on la velocitat és nul·la, i per tant, la pressió és màxima. Aquest, es troba en la punta davantera de la taula, de color blau fosc.

Per altra banda, en aquesta distribució s'observa clarament el deixant. Aquest, és representat en colors blaus i verds, ja que són els colors que s'indiquen a la llegenda per velocitats baixes. Així doncs, té sentit ja que el fluid forma aquests remolins creats pel gradient advers de pressions.



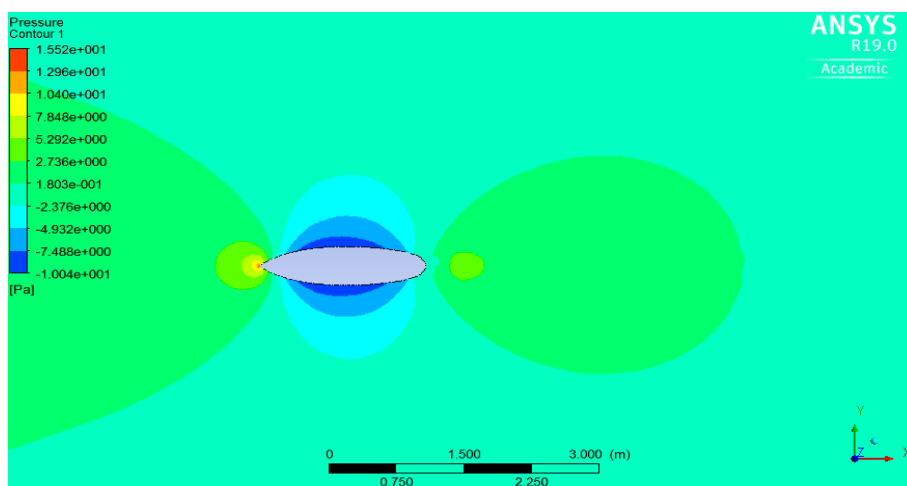


*Figura 58: Camp de velocitats per a la taula estàndard*

### **7.3.7. Taula shortboard innovadora**

#### **Camp de pressions:**

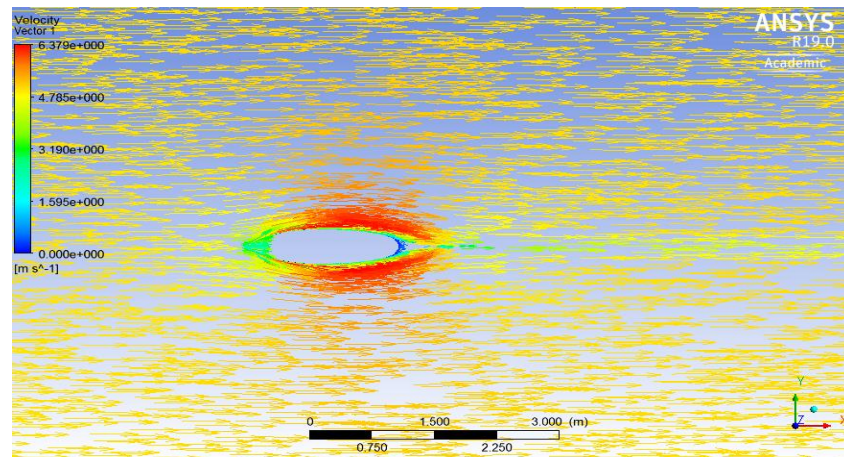
Les conclusions preses per aquesta figura són exactament les mateixes que per a la taula estàndard. Malgrat que en comptes de tenir una pressió màxima de 15,73 Pa s'ha obtingut una de 15,52 Pa. Així, s'ha pres consciència que la diferència és mínima.



*Figura 59: Distribució de pressions per a la taula innovadora*

### **Camp de velocitats:**

Les conclusions preses per aquesta figura són exactament les mateixes que per a la taula estàndard. Malgrat que en comptes de tenir una velocitat mínima de 6,387 m/s s'ha obtingut una de 6,379 m/s. Altre cop, la diferència és mínima.

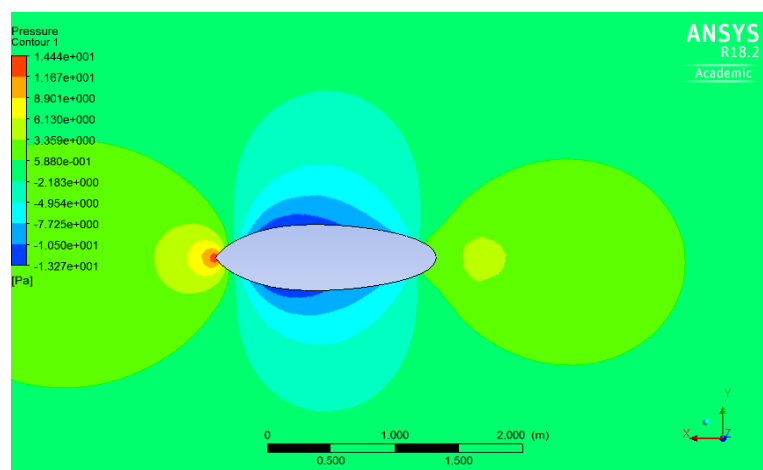


*Figura 60: Distribució de vectors velocitat per a la taula innovadora*

### **7.3.8. Retro**

#### **Camp de pressions:**

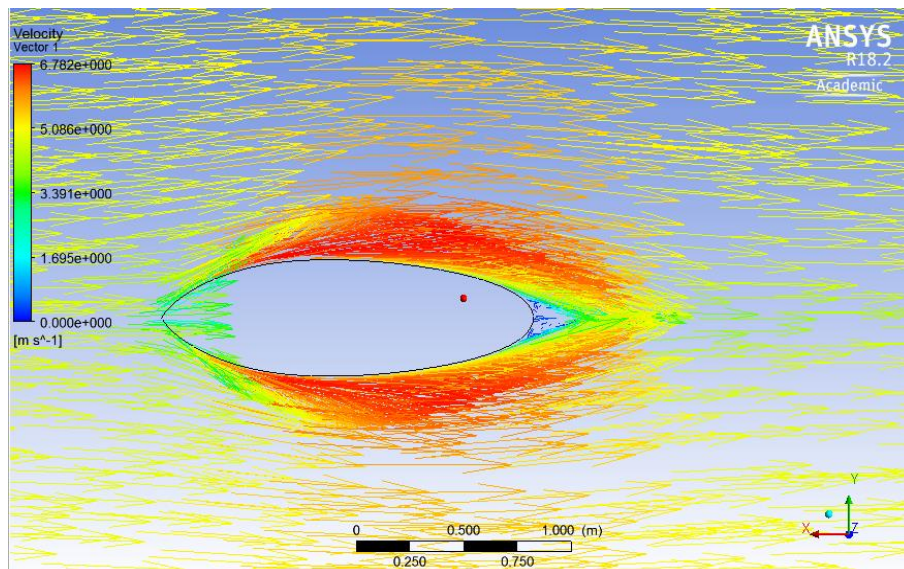
La pressió màxima obtinguda es troba en el punt d'estancament i és de 14,44 Pa.



*Figura 61: Distribució de pressions per a la taula retro*

### **Camp de velocitats:**

La velocitat màxima obtinguda es troba passat el *nose* de la taula i ha estat de 6,782 m/s.

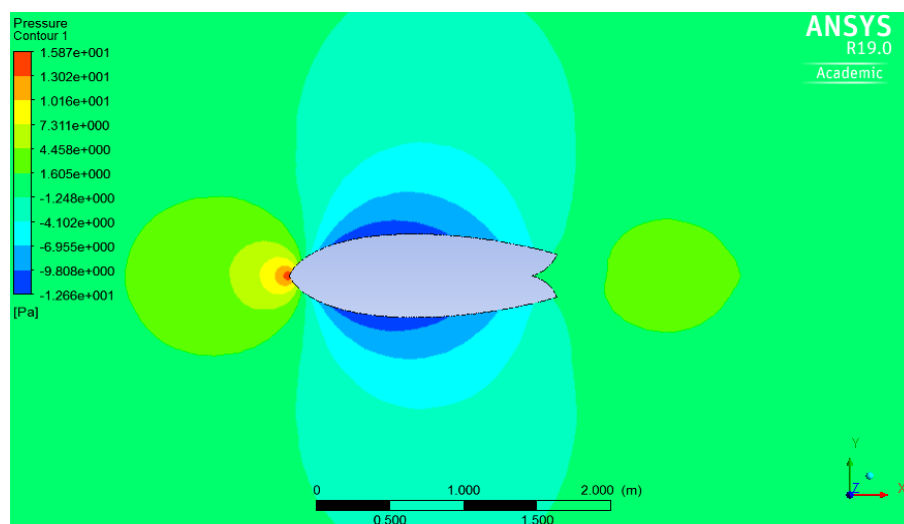


*Figura 62: Distribució de vectors velocitat per a la taula retro*

### **7.3.9. Fish**

#### **Camp de pressions:**

La pressió màxima obtinguda a la punta per a la taula *fish* ha estat de 15,87 Pa.

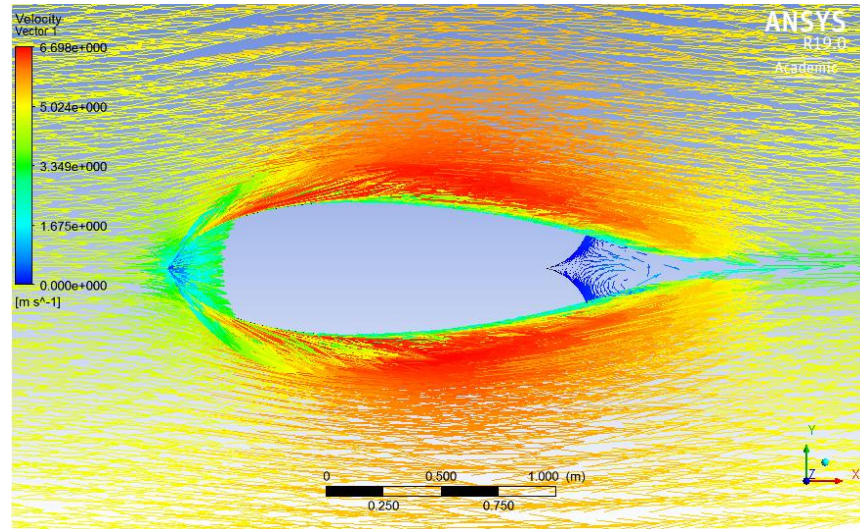


*Figura 63: Distribució de pressions per a la taula Fish*



### **Camp de velocitats:**

La velocitat màxima obtinguda es troba passat el *nose* de la taula i ha estat de 6,698 m/s.

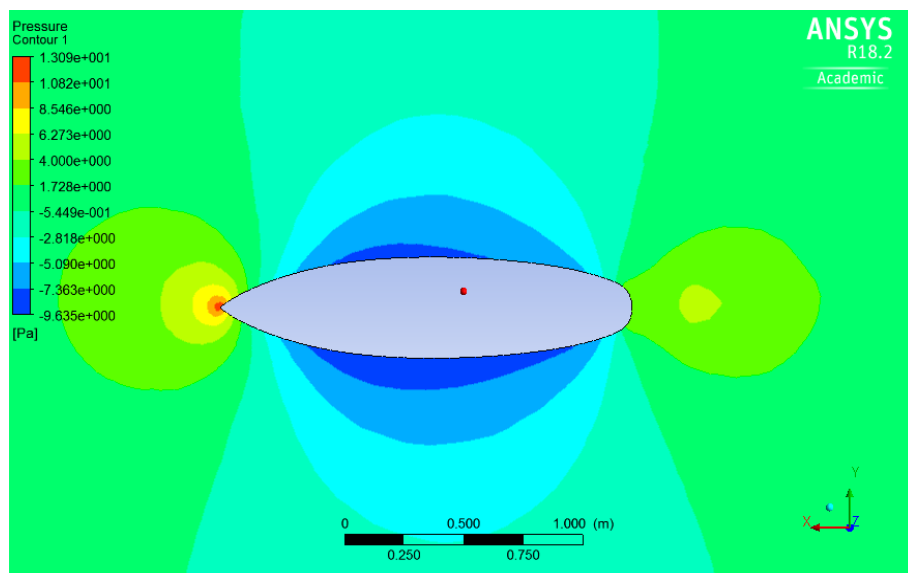


*Figura 64: Distribució de velocitat de la taula Fish ampliada*

### **7.3.10. Tow-In**

#### **Camp de pressions:**

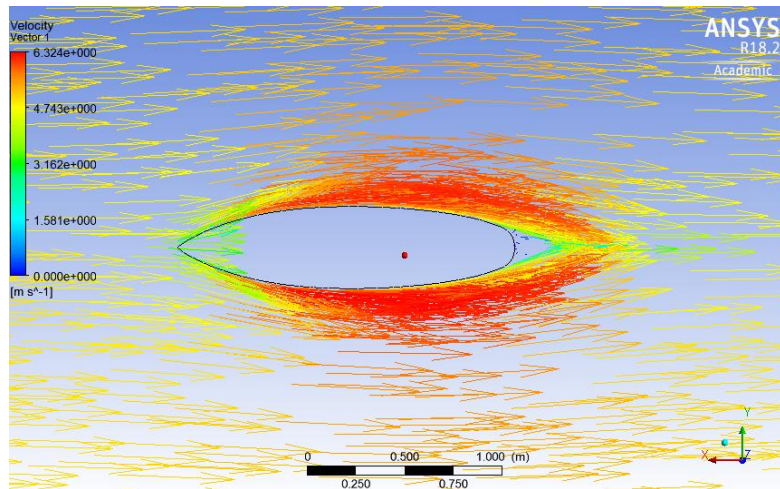
La pressió màxima obtinguda a la punta per a la taula *tow-in* ha estat de 13,09 Pa. Cal destacar que aquest valor ha estat el més petit que s'ha trobat en els camps de pressió.



*Figura 65: Camp de distribució de pressions per a la taula Tow-In*

### **Camps de velocitats:**

La velocitat màxima obtinguda es troba passat el *nose* de la taula i ha estat de 6,324 m/s. De fet, es tracta de la velocitat màxima més petita trobada en relació a les altres simulacions.



*Figura 66: Camp de distribució de vectors velocitat per a la taula Tow-In*

	<i>V<sub>màx</sub> [m/s]</i>	<i>P<sub>màx</sub> [Pa]</i>
<i>SUP</i>	6,518	15,21
<i>Longboard</i>	6,519	15,7
<i>Gun</i>	6,397	15,82
<i>Mini-Malibu</i>	6,533	15,51
<i>Evolutiva</i>	6,362	15,35
<i>Shortboard estàndard</i>	6,387	15,73
<i>Shortboard Innovadora</i>	6,379	15,72
<i>Retro</i>	6,782	14,44
<i>Fish</i>	6,698	15,87
<i>Tow-in</i>	6,324	13,09

*Taula 1: Taula resum de les pressions i velocitats màximes de cada taula de surf estudiada*

## 7.4. Resultats del $C_D$

Pel que fa als coeficients de resistència al l'avanç trobats en la simulació, s'han resumit detalladament a la *Taula 2*. Sembla ser que els cossos que presenten més *drag* són les *shortboard* mentre que, les que presenten menys resistència a l'avanç són les SUP o les *longboard*. Per tant, s'ha vist que les taules de surf que tenen un perfil similar al el cos semi infinit de Rankine són les que presenten un menor valor del  $C_D$ . Així doncs, té sentit ja que aquest tipus cos és molt aerodinàmic a causa que no es desprèn la capa límit.

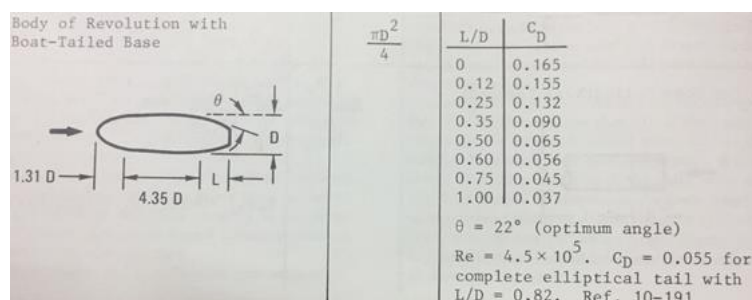
Aparentment, els resultats obtinguts tenen coherència experimentalment parlant. Tal i com s'ha explicat a la introducció, a l'hora de remar i d'agafar onades proporcionen més velocitat les taules amb més volum. Per tant, sembla ser que les taules ideals per principiants són les que tenen aquest coeficient més petit.

	<i>Longitud [mm]</i>	<i>Amplada [mm]</i>	<i>Àrea [mm<sup>2</sup>]</i>	$C_D$
<i>SUP</i>	2769,1	762	1,654	<b>0,044305</b>
<i>Longboard</i>	2808	584,2	1,410	<b>0,044804</b>
<i>Gun</i>	2167	508	0,825	<b>0,053933</b>
<i>Malibu</i>	2427,8	548,2	1,204	<b>0,045989</b>
<i>Evolutiva</i>	2184,4	546	0,991	<b>0,054292</b>
<i>Shortboard Estàndard</i>	1850	480	0,682	<b>0,072138</b>
<i>Shortboard innovadora</i>	1850	480	0,679	<b>0,08303</b>
<i>Retro</i>	1727,2	533	0,703	<b>0,062803</b>
<i>Fish</i>	1816,1	584,2	0,852	<b>0,082292</b>
<i>Tow-in</i>	1727,2	419,1	0,556	<b>0,064683</b>

*Taula 2: Longitud, amplada, àrea i Coeficient de Drag de totes les taules*

## 7.5. Comprovació dels resultats

Per tal de comprovar si els resultats obtinguts tenen sentit, s'ha consultat al llibre (Blevins, Applied Fluid Dynamics Handbook, 1984).



Taula 3: Relació amplada i longitud amb el coeficient de resistència al avanç

Per tal de comprovar si el coeficient de resistència a l'avanç trobat durant les simulació és lògic, s'ha utilitzat la Taula 3. S'ha fet la comprovació amb el *longboard*. El paràmetre L fa referència a la longitud del *tail* i la D a l'amplada de la taula. Així doncs, s'ha observat els plànols d'aquesta taula i s'ha arribat al resultat següent:  $L=434,8$  mm i  $D= 584,2$  mm. Així, el resultat de  $L/D$  és de 0,7442 aproximadament 0,75. Per tant, el  $C_D$  teòric es troba al voltant de 0,045.

Arribats en aquest punt, s'ha consultat a la Taula 2. El coeficient de resistència al avanç en la simulació del *longboard* ha estat de 0,044804. Així doncs, s'ha conclòs que la simulació feta amb el software per trobar el coeficient de *drag* és correcta.

Per altra banda, amb ajuda del llibre [5] a la pàgina 511 i 517 s'ha trobat la velocitat màxima per a un cos semi infinit de Rankine (Figura 67) i d'un Oval de Rankine (Figura 68) d'un flux potencial, no viscos i bidimensional. Així doncs, observant ambdues formes, es pot apreciar una gran similitud amb les taules de surf. Per tant, s'ha mesurat mitjançant les següents formules la velocitat màxima teòrica que pot arribar el fluid.

$$V_{m\grave{a}x} = 1,26 \cdot V$$

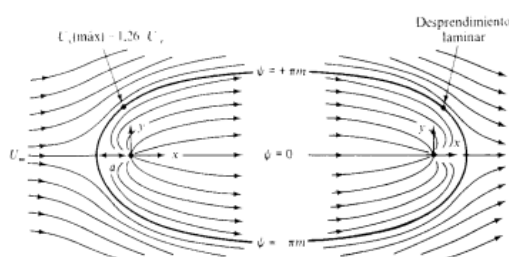
Equació 3: Cos semi infinit de Rankine

$$V_{m\grave{a}x} = 1,74 \cdot V$$

Equació 4: Oval de Rankine

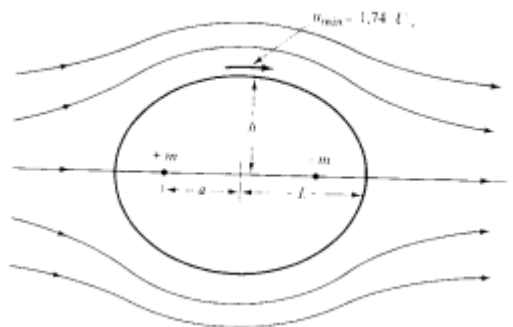
*Taula 4: Equacions teòriques de la velocitat màxima*

Quant a el cos semi infinit de Rankine, s'ha calculat la velocitat màxima teòrica. El paràmetre  $U$  que es troba en l' *Equació 3* fa referència a la velocitat del fluid a l'infinit, és a dir, la que s'ha imposat prèviament a l'entrada per tant, 5 m/s. Així doncs, fent els càlculs adients, s'ha trobat que la velocitat màxima teòrica per a un cos semi infinit de Rankine és de 6,3 m/s.



*Figura 67: Cos semi infinit Rankine [5]*

Per altra banda, s'ha estudiat la velocitat màxima teòrica d'un fluid a través d'un Oval de Rankine. Prenent com a velocitat a l'infinit 5 m/s, s'ha calculat que el fluid pot arribar a una velocitat màxima de 8,7.



*Figura 68: Oval de Rankine [5]*

Concloent, s'ha fet visualitzar la velocitat màxima en la simulació de la taula *Shortboard* que es troba la *Figura 58*. Aquesta és de 6,387 m/s. Així doncs, s'ha considerat que la fórmula d'un cos semi infinit s'aproxima més a experiment. L'error que s'obté és de 1,38 % mentre que per a la forma d'oval es té un error de 26,58%.

A més, pel que fa a les altres taules de surf s'ha comprovat que la velocitat màxima trobada mitjançant el programa de simulació es troba dins el rang de valors de [6,3 ; 8,7] trobats amb les equacions de Rankine.

Per altra banda, observant les velocitats màximes del flux semblaria ser que *la tow-in* i la *shorboard* són les que va més ràpid. Pel que fa a la taula *fish* s'observa un deixant molt més gran que a les demés taules de surf. En relació a les pressions màximes, s'ha obtingut un rang de valors molt concret [13'09; 15'87]. Sent la pressió màxima de la *tow-in* la més petita i la més gran, fa referència a la *fish*.

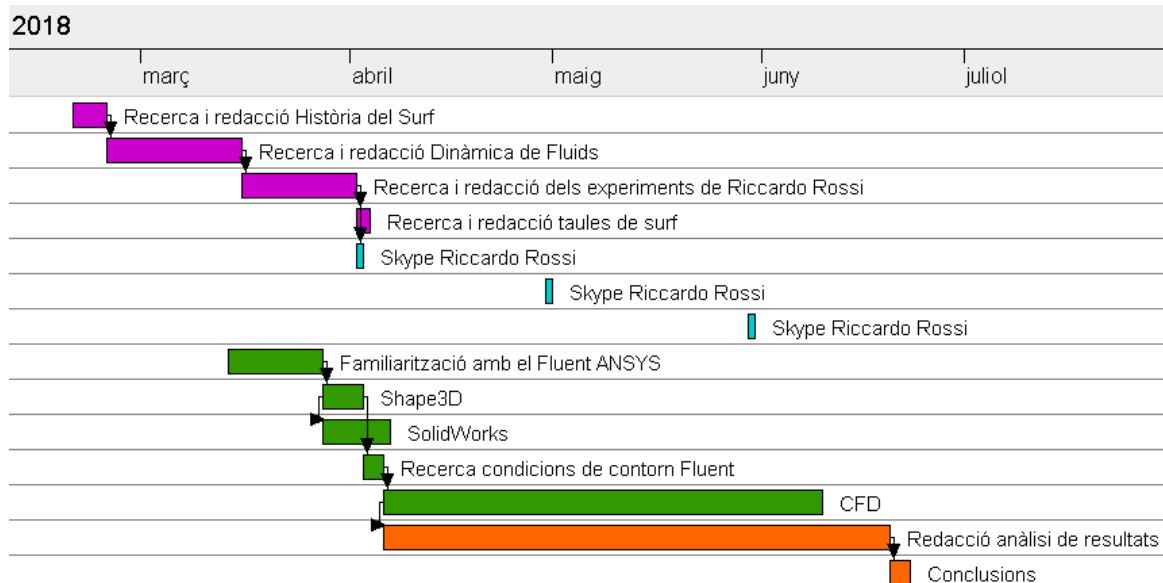
## 8. Planificació

Aquest treball s'ha realitzat durant el quadrimestre de primavera del curs 2017-2018. La seva data d'inici ha estat el dia del seu registre, és a dir, el dia 19 de febrer del 2018. El projecte ha finalitzat el dia 21 de juny, és a dir, el dia de l'entrega final. Així doncs, la durada total del projecte ha estat de 18 setmanes. El recorregut que s'ha pres consta de diferents fases les quals s'expliquen a continuació. Aquesta fase del treball s'ha realitzat mitjançant el programa Gantt Project.

La primera és la part de recerca i redacció, ja que abans de dur a terme qualsevol projecte és molt important realitzar primerament un estudi exhaustiu del mercat i, una recerca de la informació necessària (en el *Gràfic 2*, de color lila).

En segon lloc, un cop s'ha fet la recerca i la redacció de la part teòrica s'ha procedit a la realització de la part de simulació (en el *Gràfic 2*, de color verd). Simultàniament, tal i com s'indica en el mateix gràfic, de color blau, s'ha fet un seguiment del treball amb l'enginyer Riccardo Rossi.

Finalment, s'ha procedit a la redacció dels resultats i de les conclusions obtingudes (en el *Gràfic 2*, de color taronja). Tanmateix, també s'ha hagut de fer una part de recerca, ja que s'ha volgut investigar i profunditzar sobre els resultats obtinguts en la simulació.



*Gràfic 2: Diagrama de Gantt de les activitats realitzades durant el projecte*

Nom	Inici	Finalització
• Recerca i redacció Història del Surf	19/02/18	23/02/18
• Recerca i redacció Dinàmica de Fluids	24/02/18	15/03/18
• Recerca i redacció dels experiments de Riccardo Rossi	16/03/18	01/04/18
• Recerca i redacció taules de surf	02/04/18	03/04/18
• Skype Riccardo Rossi	02/04/18	02/04/18
• Skype Riccardo Rossi	30/04/18	30/04/18
• Skype Riccardo Rossi	30/05/18	30/05/18
• Familiarització amb el Fluent ANSYS	14/03/18	27/03/18
• Shape3D	28/03/18	02/04/18
• SolidWorks	28/03/18	06/04/18
• Recerca condicions de contorn Fluent	03/04/18	05/04/18
• CFD	06/04/18	09/06/18
• Redacció anàlisi de resultats	06/04/18	19/06/18
• Conclusions	20/06/18	22/06/18

Recerca i redacció	
Recerca	
Fase de simulació	
Redacció	

*Taula 5: Activitats del projecte, inici i final*



## 9. Estudi econòmic

Arribats en aquest punt, s'ha fet un estudi econòmic del cost global del projecte. S'ha realitzat una aproximació, com si un client fes un encàrrec a una empresa d'enginyeria treballant així, un enginyer en pràctiques de la UPC.

Així doncs, a la *Taula 6* s'ha fet un resum de les despeses produïdes durant la realització del projecte. D'aquesta manera, s'ha vist que les llicències contribueixen fortament a l'augment del preu total del projecte. No obstant això, la utilització d'aquests programes redueixen notablement el temps invertit per cada experiment podent fer així, més iteracions.

Per altra banda, cal destacar la poca utilització de material físic. Això últim, s'ha aconseguit gràcies a la implementació del programa de simulació Ansys Fluent.

Fins a l'actualitat, per al disseny de taules de surf sempre s'ha seguit un procés de “*prova-error*”, és a dir, que el cost d'aquest projecte hauria estat molt més alt, ja que s'hauria necessitat la creació real dels models geomètrics.

A més a més, s'ha considerat que per a la realització del projecte s'ha llogat un estudi per 1000 €/mes i una potència contractada de 3 KW, establint un cost del KWh de 0,15 €.

Per altra banda, s'ha afegit un 30% de beneficis del cost total del projecte destinats l'empresa en la qual està treballant l'enginyer en pràctiques.

Finalment, el cost total del projecte és de 32717,865 €. A continuació, es mostra una taula resum amb totes les despeses desglossades.

Concepte	Preu unitari	Temps	Total [€]
Enginyer en pràctiques	10 € / h	378 h [18(s)x7(d/s)x3(h/d)]	3780
Llicència SolidWorks	283,33 €/mes	4 mesos	1133,33
Llicència Shape3D	100 €/mes	4 mesos	400
Llicència Ansys 19	3475,85 €/mes	4 mesos	13903,33
Llicència Microsoft Office	5,75 €/mes	4 mesos	23
Material	300 €/mes	4 mesos	1200
Consum energètic	0,15 €/KWh	400 hores	180
Consum transport	60 h/viatge	3 viatges	180
Total Projecte			20799,66
Total + benefici industrial	30 % benefici		27039,558
Total + benefici + IVA	21 %		32717,865

*Taula 6: Cost total del projecte*

## 10. Impacte ambiental

Com s'ha explicat en l'apartat anterior, per tal de dur a terme aquest estudi no s'ha utilitzat material físic. També, s'ha explicat que fins ara per al disseny de les taules de surf els dissenyadors primer les creaven i després, segons el parer del surfista (subjectivament) es decidia sobre l'efecte que produïa la forma creada. Així, gràcies als avenços tecnològics s'ha pogut reduir el impacte mediambiental en aquest sentit.

Tot i que, cal dir que en el surf juga un paper molt important les sensacions del surfista i que, s'hauria d'investigar encara molt més per tal de que les conclusions extretes de les simulacions s'aproximin cada vegada més a la realitat.

Per altra banda, l'eina bàsica per a la realització de l'estudi ha estat l'ordinador. De fet, s'ha necessitat un de potent, ja que s'havien de dur a terme gran quantitat de càlculs i que, han comportat molt de temps i energia. Aquest fet, es pot veure clarament a la apartat anterior on, al *Gràfic 2* s'aprecia el número d'hores que se li ha dedicat al càlcul de les simulacions. Per tant, la quantitat d'hores invertides ha suposat un desgast d'aquesta eina. Tanmateix, l'estudi ha perjudicat al medi ambient aportant un elevat consum d'electricitat deguda a l'alimentació de la bateria.

Per tant, en aquest aspecte cal tenir en compte la normativa europea que fa referència a la regulació dels residus electrònics, la Directiva 2002/96/CE (RAEE). Aquesta, estipula que la recollida, transport, emmagatzematge i extracció de components electrònics ha dur-se a terme mitjançant una empresa autoritzada.

Per últim, en la història del surf s'ha anat creant un estil de vida propi on, es consciencia als que el practiquen a cuidar i conservar la natura. De fet, les grans empreses del sector estan controlades per tal de causar el menor risc i impacte a l'entorn on s'estableixen. En aquest punt, cal recordar que el surf és un esport que existeix gràcies a l'energia provinent de les onades, és a dir, es basa en l'ús d'una energia renovable per a l'entreteniment. Per tant, aquest esport no té cap repercussió a nivell mediambiental.



## 11. Conclusions del treball

Concloent aquest projecte, cal dir que s'han assolit els objectius proposats. En primer lloc, s'ha fet ús i s'ha profunditzat dels coneixements de l'alumne de l'assignatura de Mecànica de Fluids per tal d'estudiar les diverses formes de taules de surf. En segon lloc, s'han ampliat els coneixements de l'autor d'aquest projecte en el software ANSYS Fluent. Per altra banda, gràcies a l'estudi de Riccardo Rossi (en 3D) com al de l'alumne (en 2D), s'han aconseguit uns resultats coherents i que concorden de manera general amb la realitat del surf.

Per acabar, tots els treballs de final de grau tenen un mateix objectiu comú i és el de descobrir nous escenaris per a futures investigacions. Així doncs, l'alumne no ha arribat a obtenir resultats coherents en l'intent del model en 3D (el resultat obtingut es troba a l'annex). Per altra banda, no s'ha pogut fer l'estudi amb un flux bifàsic a causa de la seva complexitat i la manca de temps. Tanmateix, en el grau d'enginyera en tecnologies industrials de la UPC no s'ha impartit aquest tipus de problema. Per tant, s'hauria de continuar aquest projecte fent l'estudi de simulació del model en 3D i, mitjançant la utilització d'un flux bifàsic.

Pel que fa als resultats gràfics del treball, se sap que s'hauria pogut obtenir resultats més precisos si s'hagués fet l'estudi amb un dispositiu més potent i amb més marge de temps. El fet és que s'han dut a terme un total de 10 simulacions (sense tenir en compte les proves inicials) i que cada simulació ha requerit un temps total de com a mínim 3 hores. A més, quan s'ha intentat fer un mallat més fi, el propi ordinador ha fallat perquè no ha pogut realitzar tots els càlculs sol·licitats. No obstant això, en tractar-se d'un estudi purament comparatiu el que s'ha intentat fermament ha estat que les qualitats dels mallats entre les diferents formes siguin molt similars. Així doncs, per a futures investigacions caldria obtenir un material de treball més potent i, adequat per a aquest tipus de simulacions.

Segons sembla, pels resultats extrets de la simulació feta per l'autor del projecte, les taules de surf més llargues i amb *nose* més arrodonit (aquelles que més s'assemblen al cos semi infinit de Rankine) són les que ofereixen una menor resistència a l'avanç i per tant, proporcionen més rapidesa al surfista. Aquest fet, semblaria ser que valida el que s'ha explicat a la introducció d'aquest treball. S'ha dit que quan es comença a practicar el surf

s'utilitzen taules grans, ja que col·loquialment s'havia dit que eren les que proporcionaven més facilitat al surfista en la remada i en la presa de l'onada.

Per altra banda, fent un procés exhaustiu d'investigació i amb l'ajuda del material de suport CFD s'ha arribat a un coneixement més profund de com interacciona el flux bifàsic amb la taula i aquesta, directament amb el surfista.

Així doncs, pel que fa a la part del *Rail*, semblaria ser que si el que es vol és tenir més maniobrabilitat a l'hora de produir una traça en l'onada es preferirà el *Hard Rail*. Mentre que, si el que es vol és notar la taula més connectada amb l'onada i més velocitat es preferirà un *Soft Rail*.

Per altra banda, s'ha comprovat que una petita variació en el *Tail Rocker* provoca canvis al llarg de la longitud de la taula de surf. Així, s'ha vist que una conseqüència directa seria que la línia de velocitats mínimes es desplaça. Tanmateix, una taula amb menys *rocker* presenta més pressió al llarg de la seva longitud i per tant, semblaria ser més lenta.

Per acabar, s'ha vist que l'eficiència de cada taula varia en funció de la velocitat. Així doncs, una taula serà més eficient si presenta un *lift* elevat i un *drag* baix.

Així mateix, fent el procés de recerca i simulació, s'ha arribat a la mateixa conclusió comú amb l'enginyer de la Universitat de Bòlognia, Riccardo Rossi. S'ha decidit que no existeix una taula millor que una altra, sinó que l'elecció de la taula ideal depèn de les condicions i del nivell del surfista.

Com a conclusió general, s'ha arribat a resultats molt interessants i alhora, sorprenents. Així, es creu que s'ha realitzat una bona feina i que s'han assolit els objectius principals del treball de final de grau. Per tal d'obtenir resultats més vàlids per a futurs estudis, el millor seria efectuar la simulació en 3D, amb un flux bifàsic i fins i tot, arribar a realitzar experiments reals. Finalment, amb ajuda de programes de simulació, s'ha pogut unir la tecnologia amb la creativitat artística evitant el desbaratament de material i temps, podent així, produir models més innovadors.

## **Agraïments**

Primerament, m'agradaria agrair al professor Enric Trillas i Gay, tutor del present treball de final de grau, per la seva gran ajuda, els seus consells i constància durant la realització del projecte.

M'agradaria agrair l'ajuda de l'enginyer Riccardo Rossi qui, ha aportat idees i solucions molt interessants en la realització de l'estudi.

Finalment, m'agradaria agrair l'ajuda dels amics, familiars i companys pels suports i consells que he anat rebent al llarg d'aquest quadrimestre.





# Bibliografia

## ***Referències bibliogràfiques***

- [1] Article i vídeo de Ricardo Rossi, <https://firewiresurfboards.com/hydrodynamics/>
- [2] (Rossi, CFD simulation of surfboards hydrodynamics, 2018)
- [3] (Blevins, Applied Fluid Dynamics Handbook, 1984)
- [4] Plans pels models de taules, <https://www.shape3d.com/Warehouse/Default.aspx>
- [5] (Frank M. White, Mecánica de Fluidos, 2008)

## ***Bibliografia complementària***

- [6] Introducció, <https://ca.wikipedia.org/wiki/Surf>
- [7] Cavitació, <https://www.enciclopedia.cat/EC-GEC-0089676.xml>
- [8] Història del surf, <http://iml.jou.ufl.edu/projects/spring04/britton/history.htm>
- [9] Història del surf, <http://www.todosurf.com/magazine/surfologia/historia-del-surf-surf-2168.htm>
- [10] Tipus de taules de surf, <https://totalsurfcamp.com/es/blog/guia-basica-de-los-principales-tipos-de-tablas-de-surf>
- [11] Tipus de taules de surf, <http://www.todosurf.com/magazine/surfologia/tipos-de-tablas-de-surf-surf-2165.htm>
- [12] Tipus de *rocker*, <https://www.singlequiver.com/enelpico/el-rocker/>
- [13] Tipus de *tails*, <https://www.artsurfcamp.com/blog/diferentes-colas-tabla-surf/>
- [14] Tipus de *bottoms*, <https://atlantiksrf.com/tipos-de-bottom/>

- [15] Tipus de *nose*, <https://www.boardcave.com.au/the-surfers-corner/surfboard-shapes-tails-Rails-and-noses/>
- [16] Velocitat *sufista*, <https://www.surfertoday.com/surfing/5126-top-surfers-check-speed-and-distance-in-a-wave>
- [17] Tipus de rails, <http://www.boardcave.com/the-surfers-corner/surfboard-shapes-tails-rails-and-noses/>
- [18] Material de suport en les classes teòriques de l'assignatura de Mecànica de Fluids (Presentació power point 2016).
- [19] Teoria pressió i velocitat, <http://waawfoundation.org/lesson-plan-the-physics-of-flight/>
- [20] Nombres adimensionals, [https://ca.wikipedia.org/wiki/Constant\\_f%C3%ADsica\\_adimensional](https://ca.wikipedia.org/wiki/Constant_f%C3%ADsica_adimensional)

# Annex

## ***Explicació dels tipus de bottoms i tails***

### ***Bottoms***

- **Flat/Pla:** totalment pla donant-li a la taula un bon lliscament. Són taules que proporcionen velocitat i que per tant, s'usen en onades petites. Per altra banda, és difícil fer girs tancats. Normalment, aquest *bottom* s'utilitza en les taules per debutants.
- **Concave/ Còncava:** l'objectiu d'aquesta forma és crear un flux d'aigua sota la taula. Aquesta aigua queda estancada dins el *Rail* i després es comprimeix a la zona de la cua proporcionant un efecte *Venturi*, és a dir, més velocitat a la sortida del fluid. Aquesta forma, en girs tancats proporciona molta més subjecció.
- **Double concave/ doble còncava:** consisteix en dos "arcs" separats per l'ànima de la taula (*Stringer*). En general, aquesta forma es situa a tot el llarg de la taula. Proporciona subjecció i velocitat. Per altra banda, respecte la *single concave*, proporciona més facilitat alhora de canviar d'un costat a un altre de la taula.
- **Belly/ ventre:** es tracta d'una forma convexa. Aquesta, desplaça l'aigua cap als costats, deixant que s'escapi pels *Rails*. A velocitats altes facilita el canvi de costat de la taula fent que s'incrementi el control sobre ella.
- **VEE :** la seva manera de funcionar és molt semblant a la forma anterior però, en comptes de ser una corba són dos segments rectes que s'uneixen al *Stringer*. Aquest *bottom* es pot trobar a la part del davant de la taula (*nose*) com a la part del darrera (*tail*).

### ***Tails***

- **Square tail/ cua quadrada:** el acabat en tall recte permet aconseguir millors girs. Així, aquest tipus és ideal per onades petites. No obstant, aquest model no és gaire estable ja que no dirigeix el flux de l'aigua però si, aporta major velocitat.

- **Squash / quadrat amb vèrtex arrodonits:** adapta diversitat de condicions. Aporta bona adherència i estabilitat en onades grans alhora que ens permet fer bones maniobres i girs.
- **Pin *tail* / cua de pic:** deixa el control de la paret de l'onada però no destaca per la velocitat que aporta, per tot això es considera ideal per surfejar onades grans, buides i amb molta força ja que ens ajuda a aconseguir més adherència. El que no proporcioni velocitat extra no es considera negatiu ja que el mateix mar ens aporta força i velocitat.
- **Round Pin *tail* / un pic amb vèrtex arrodonits:** tracta d'una modificació del *pin tail* i aporta major maniobrabilitat a la taula de surf però manté la seva adherència i estabilitat, per això és utilitzada per ones mitjanes i grans amb molta potència.
- **Swallow *tail* / cola d'orenet:** Aquest model de cua acaba en dues puntes, el que fa que l'aigua sigui expulsada de forma ràpida però controlada, aportant gran capacitat de gir o maniobrabilitat, així com bona adherència i estabilitat. Es considera genial per al surf de onades petites sense massa força.
- **Diamond *tail* / cua de diamant:** com es pot veure en el dibuix de dalt, aquesta forma de cua intenta combinar la cua quadrada amb la de pic. Aconsegueix resultats molt semblants a la cua quadrada encara que potser aportí més estabilitat i per tant s'adapta a tot tipus d'onades.
- **Bat *tail* / cua de ratpenat:** acabada en tres pics, aquest model de cua proporciona una major adherència ja que l'aigua surt per darrere de manera proporcionada aportant major control.

## ***Mallats***

	<i>Nodes</i>	<i>Elements</i>
<i>SUP</i>	47386	78411
<i>Longboard</i>	41498	77531
<i>Gun</i>	40238	76010
<i>Malibu</i>	37577	73885
<i>Evolutiva</i>	43852	76531
<i>Shortboard Estàndard</i>	49809	93673
<i>Shortboard Innovadora</i>	47498	87977
<i>Retro</i>	37787	74452
<i>Fish</i>	47754	90280
<i>Tow-in</i>	45840	78704

*Taula 7: Mallat utilitzat per a les diverses taules*

# Plànols de les taules de surf

## Plànols del SUP

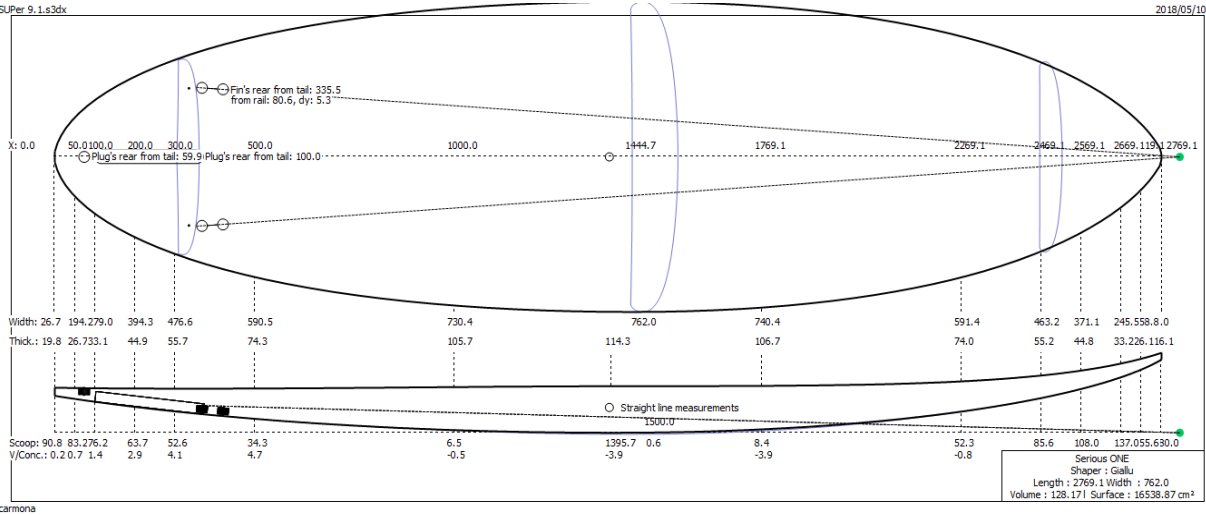


Figura 69: Plànols del SUP amb el programa Shape3D

## Plànols del longboard

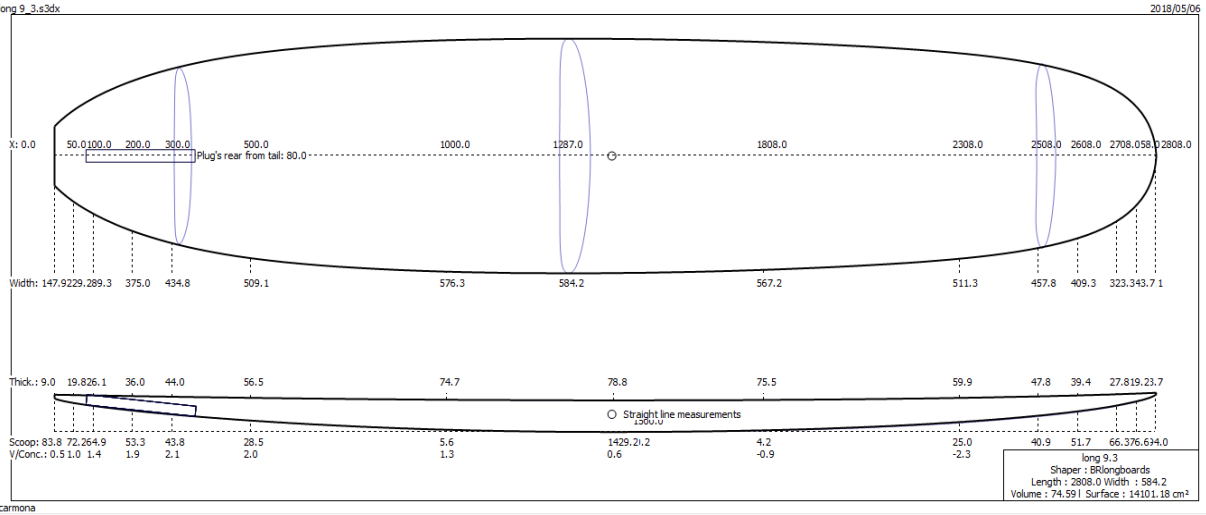


Figura 70: Plànols del longboard amb el programa Shape3D

## Plànols de la Gun

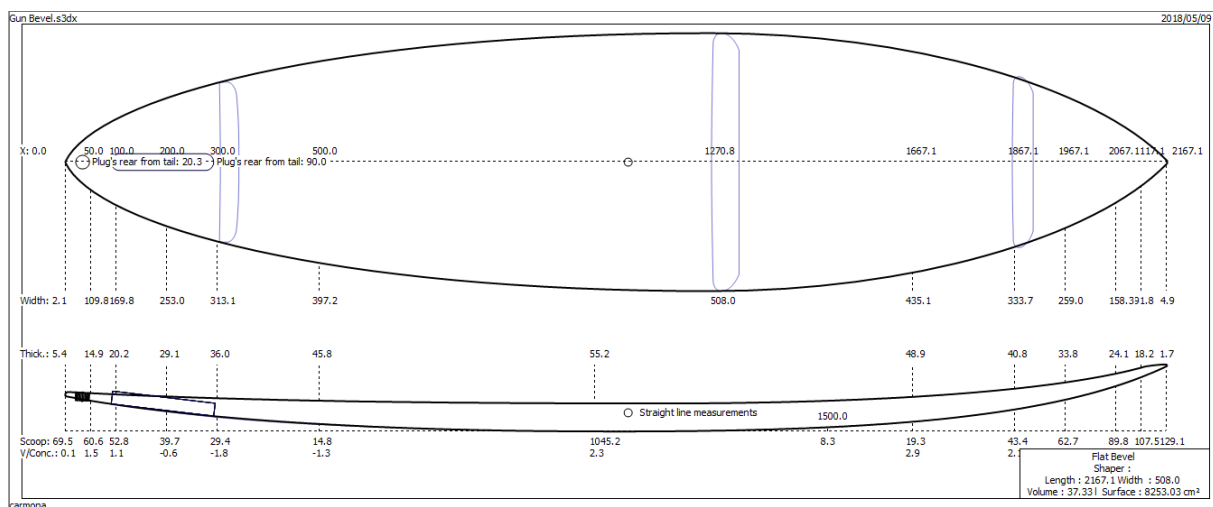


Figura 71: Plànols de la Gun amb el programa Shape3D

## Plànols de la Malibu

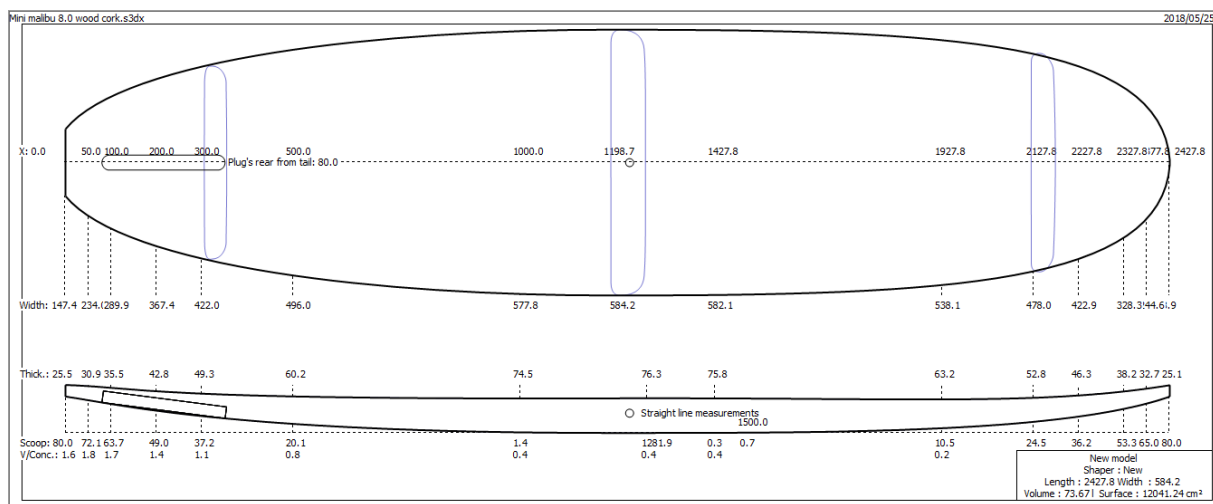


Figura 72: Plànols de la Malibu amb el programa Shape3D

## Plànols de l'Evolutiva

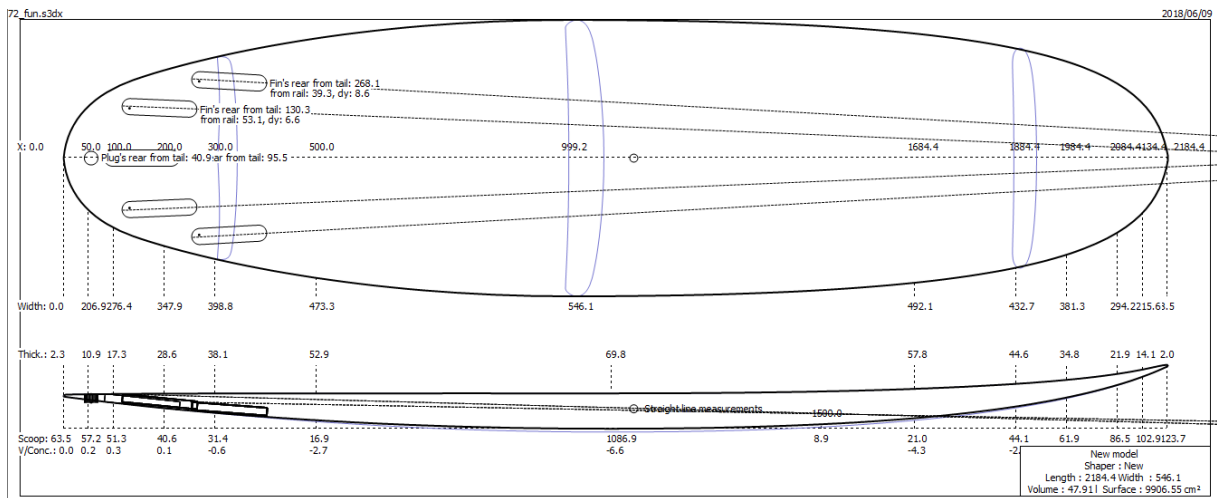


Figura 73: Plànols de l'evolutive amb el programa Shape3D

## Plànols de la Shortboard

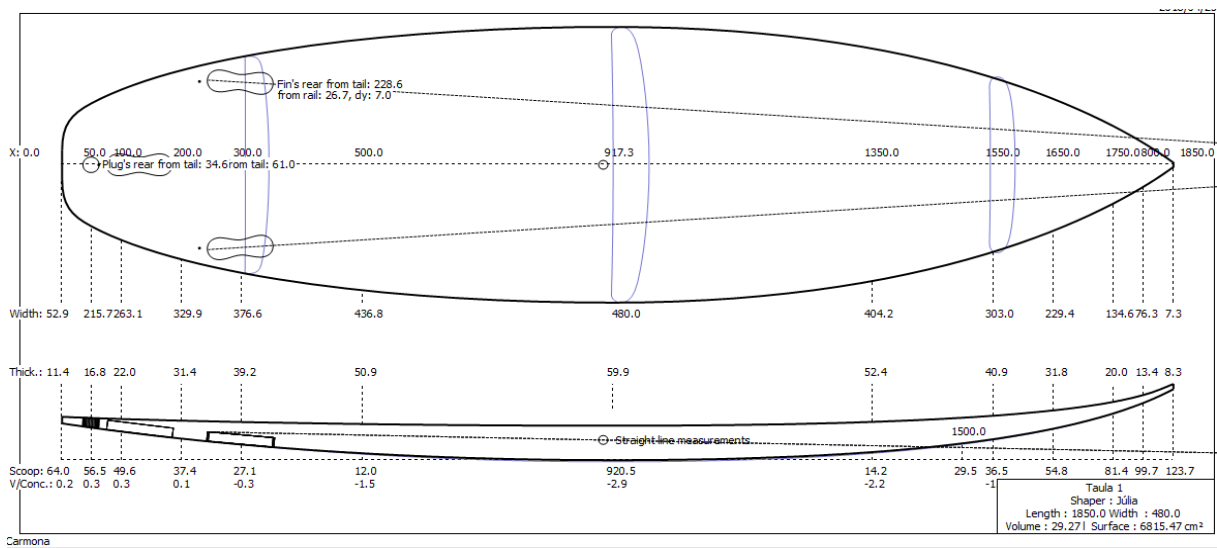


Figura 74: Plànols de mesures de la taula estàndard amb Shape3D



## Plànols de la retro

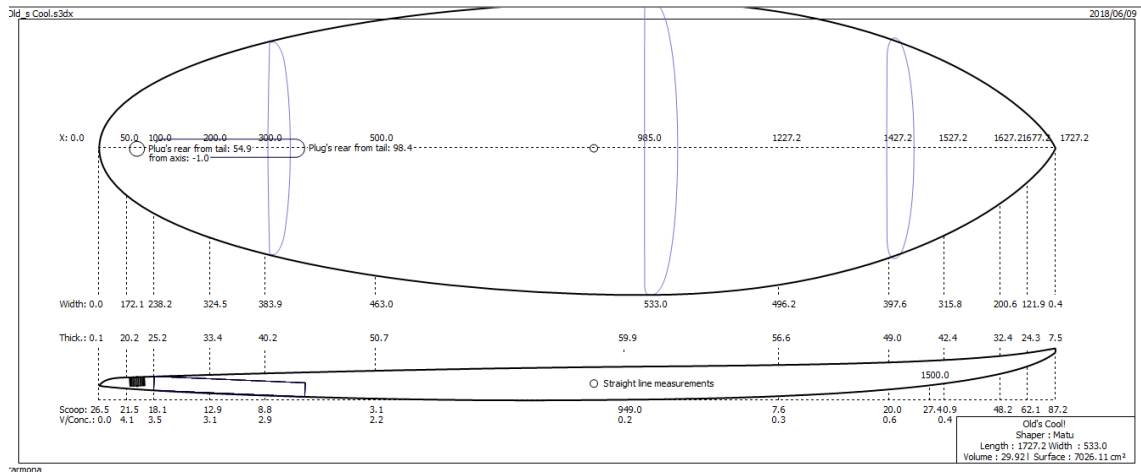


Figura 75: Plànols de mesures de la taula retro amb Shape3D

## Plànols de la Fish

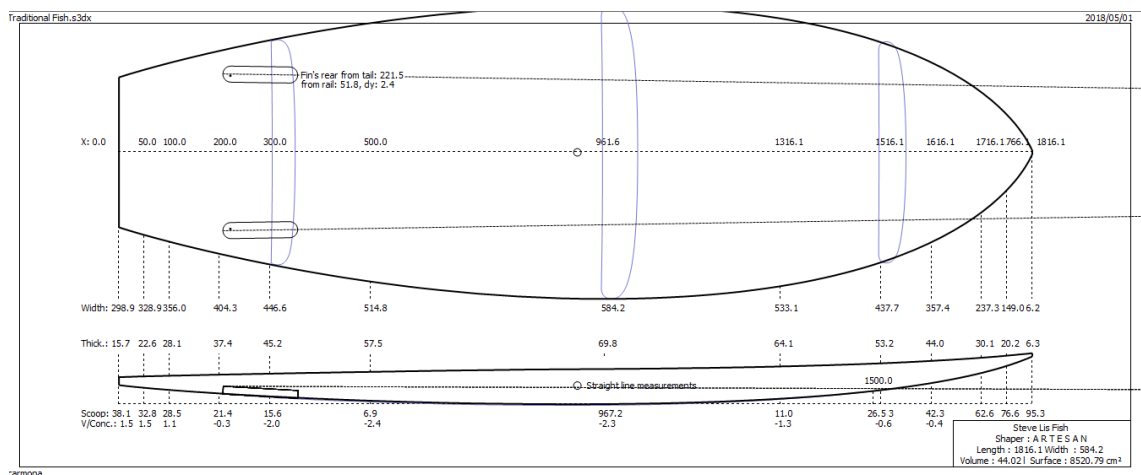


Figura 76: Plànols de mesures de la taula fish amb Shape3D

El programa Shape3D no permetia visualitzar les mesures de la cua de la taula. Per tant, la cua d'oreneta s'ha fet mitjançant la següent figura:

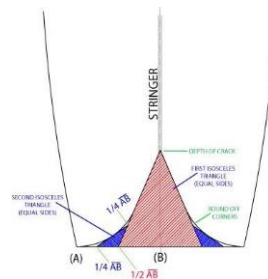


Figura 77: Relacions trigonomètriques per a la Cua d'Oreneta

## Plànols de la Tow-In

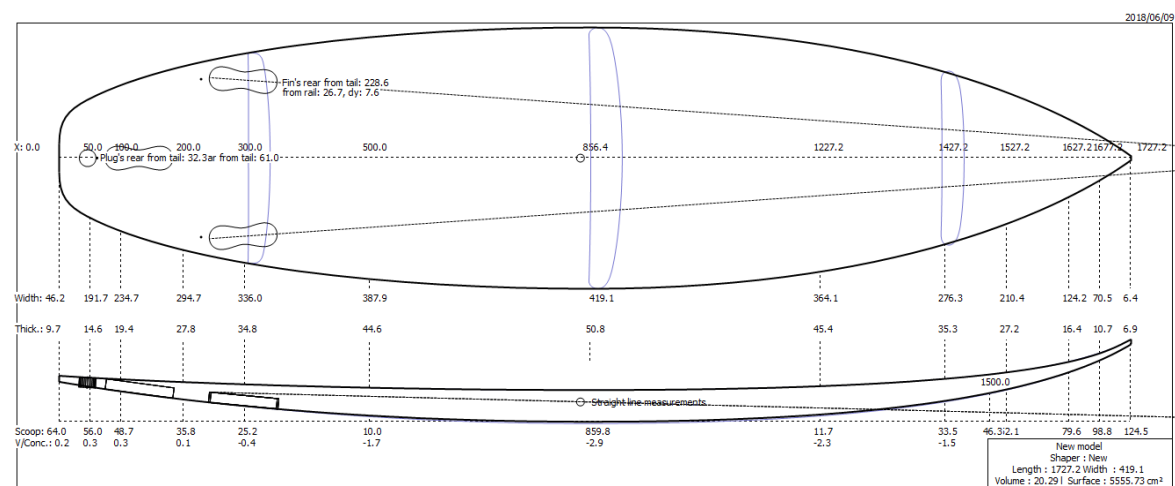


Figura 78: Plànols de mesures de la taula Tow-In amb Shape3D

## Model en 3D

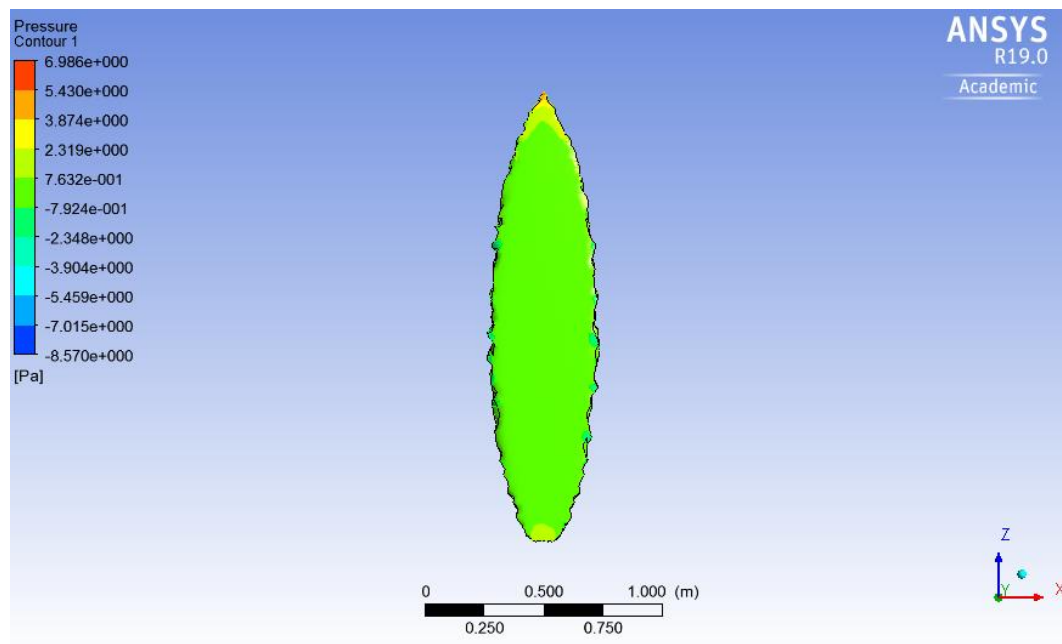


Figura 79: Pressió de la taula en 3D

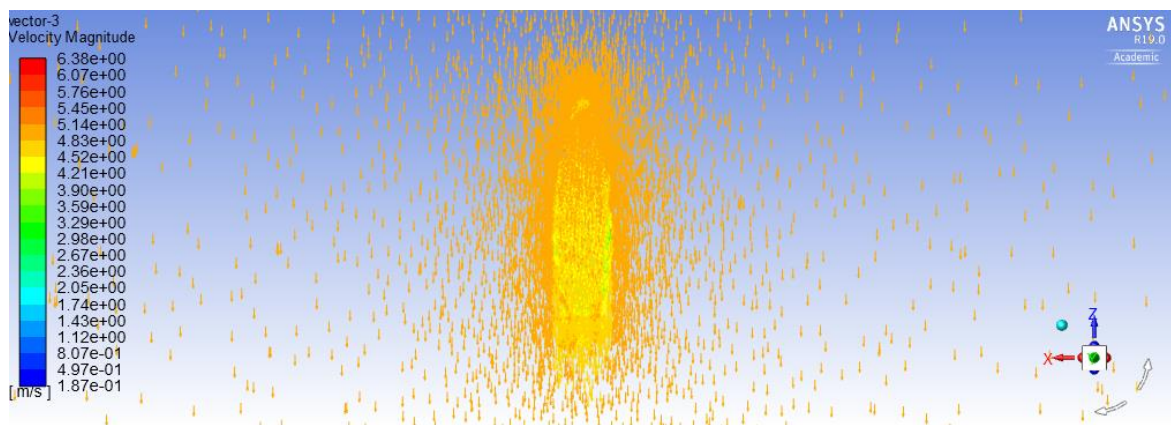


Figura 80: Vectors velocitat de la taula en 3D